

PERANCANGAN KONTROLER *FUZZY PD* UNTUK KONTROL TOLERANSI KESALAHAN SENSOR

Nama : Moch Hafid
Pembimbing : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

ABSTRAK

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) merupakan suatu *plant* nonlinear yang banyak digunakan di industri-industri kimia sebagai pengaduk bahan-bahan kimia. Proses di dalam CSTR sangat dipengaruhi oleh suhu, di mana suhu tersebut didapat dari uap panas yang mengalir di dalam dinding tangki melalui pipa, sehingga suhu tersebut harus dijaga supaya tetap berada pada suhu kerja dengan merancang suatu kontroler. Suhu di dalam tangki dideteksi oleh sensor dan dari informasi pengukuran tersebut, kontroler akan memberikan sinyal kontrol sehingga proses yang terjadi pada CSTR dapat kembali berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Kesalahan pengukuran pada sensor dapat menyebabkan proses tidak berjalan dengan baik, bahkan dapat mengakibatkan berhentinya proses. *Fault Tolerant Control (FTC)*, kontrol toleransi kesalahan, dapat memberikan kompensasi sehingga proses dapat berjalan dengan baik meskipun terjadi kesalahan pengukuran pada sensor. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan kontroler *fuzzy PD* untuk menjaga suhu di dalam CSTR tetap berada pada suhu kerja. Kesalahan sensor yang terjadi pada sistem diidentifikasi untuk menentukan kategori-kategori kesalahan sensor. Tiap kategori memiliki nilai-nilai kompensasi terhadap kesalahan yang terjadi. Dengan adanya kompensasi tersebut maka proses pada CSTR dapat beroperasi dengan baik meskipun terjadi kesalahan pengukuran pada sensor.

Kata Kunci: *Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)*, Kontroler *Fuzzy PD*, *Fault Tolerant Control*

FUZZY PD CONTROLLER DESAIGN FOR SENSOR FAULT TOLERANT CONTROL

Name : Moch Hafid
Advisor : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

ABSTRACT

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) is a non-linear plant that used in many industries such as chemical industries to mixes chemicals matters. The process in CSTR has it's own working temperature which came from the hot steam that flow in the tank's wall by the tube to work properly, so that it has to be controlled due to it's high sensitive character to the changes of temperature. The temperature inside the tank is measured by sensors. The controller take the information from the sensor and result the control signal so that the process would work properly. Measurement error by the sensor could make the process work inappropriately, moreover the process could be shutdown. Fault Tolerant Control (FTC) gives compensation to the measurement error by the sensor so that the process can work properly even there's an error. In this Final Project, a fuzzy PD controller is designed to keep the CSTR's temperature stay in working temperature. The system could be identified due to the measurement error by the sensor. This result categories of the measurement errors. Each category has it's own compensation value to the measurement errors. With these compensations, CSTR could work properly even there's an measurement errors.

Keywords: Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), Fuzzy PD Controller, Fault Tolerant Control.

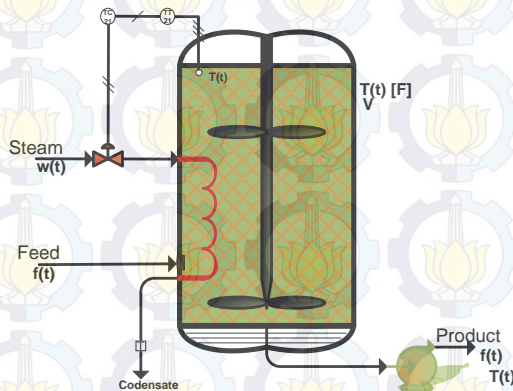
BAB II

TEORI DASAR

Pada bab ini, berisi tentang dasar teori yang digunakan sebagai landasan dalam mengerjakan Tugas Akhir. Teori tersebut meliputi *plant continuous stirred tank reactor*, teori dasar toleransi kesalahan, serta metode kontrol yang akan digunakan.

2.1 Continuous Stirred Tank Reactor [2]

Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) merupakan salah satu unit operasi yang paling penting di industri kimia dengan perilaku nonlinear. CSTR berupa suatu tangki yang umumnya berbentuk silinder dengan diameter tertentu, dimana sekeliling reaktor bisa dibiarkan terbuka (terjadi konveksi bebas antar reaktor dengan udara sekelilingnya), bisa diisolasi dengan bahan (isolator) tertentu. Sebagai salah satu reaktor kimia, didalam CSTR terjadi reaksi kimia pembentukan atau penguraian, dimana aliran masa masuk/keluar berlangsung secara terus-menerus. Reaksi kimia yang terjadi didalam CSTR, baik secara eksotermis maupun endotermik, membutuhkan energi yang dapat dihilangkan atau ditambahkan ke dalam tangki reaktor untuk mempertahankan suhu agar tetap dalam keadaan konstan.



Gambar 2.1 Peralatan *Continuous Stirred Tank Reactor* dan Diagram Proses Pemanasnya

CSTR berbeda dengan reaktor lainnya, seperti PFR (*plug flow reactors*) dan PBR (*packed bed reactors*), karena adanya proses pengadukan (*stirred*) yang memungkinkan adanya distribusi sifat fisis dan kimiawi secara merata dari zat yang bereaksi di setiap tempat dalam reaktor.

Penggunaan CSTR paling banyak memproduksi polimer, seperti polimerisasi styrene. Selain itu CSTR juga digunakan dalam pembentukan barium sulfat (BaSO_4), asam asetat, asam formiat dan penanganan limbah.

2.1.1 Model Fisik Plant

Pemodelan sistem reaktor CSTR dapat dilakukan dengan menurunkan persamaan matematis *plant*. Penurunan model matematis ini didasarkan pada hukum kesetimbangan energi dalam tangki dan kesetimbangan energi pada pipa.

Reaktor yang akan dimodelkan berupa tangki reaktor yang bersifat kontinyu dan homogen serta memiliki sifat reaksi endoterm yang artinya memerlukan energi dalam bentuk panas dari luar selama proses pencampuran berlangsung. Energi panas ini diberikan ke dalam tangki dengan cara mengalirkan uap panas ke dalam pipa yang terletak di dalam dinding reaktor.

2.1.2 Model Matematika Plant

Model dinamis pada proses CSTR yang mengacu pada kondisi-kondisi proses seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, di mana debit volume aliran fluida *inlet* dan *outlet*, berat jenis dan kapasitas panas diasumsikan sama serta kondisi tangki telah diisolasi dengan baik dan fluida dalam tangki diaduk secara merata sehingga panas yang hilang diabaikan dan energi yang dihasilkan *mixer* juga diabaikan. Dari kondisi tersebut maka akan diperoleh persamaan matematis dan fungsi alih yang menjelaskan hubungan bagaimana suhu keluaran $T(t)$ memberikan tanggapan terhadap perubahan tempertur masukan $T_i(t)$.

Sebuah *unsteady state* kesetimbangan energi pada tangki reaktor, pengendalian volume fluida pada tangki reaktor akan memberikan sebuah hubungan antara suhu *inlet* dan suhu *outlet*, yaitu tingkat energi yang masuk ke tangki reaktor dikurangi dengan tingkat energi yang keluar dari tangki reaktor sama dengan tingkat akumulasi energi yang ada dalam tangki reaktor. Dari asumsi-asumsi tersebut maka dapat dituliskan secara matematis seperti Persamaan 2.1

$$f\rho_i h_i(t) - f\rho_o h_o(t) = \frac{d(V\rho_o u(t))}{dt} \quad 2.1$$

dengan,

- f = debit aliran fluida (ft³/min)
- ρ_i = berat jenis cairan *inlet* (lb/ft³)
- ρ_o = berat jenis cairan *outlet* (lb/ft³)
- $h_i(t)$ = enthalpi cairan *inlet* (Btu/lb)
- $h_o(t)$ = enthalpi cairan *outlet* (Btu/lb)
- $u(t)$ = *internal* energi cairan dalam tangki (Btu/lb)
- V = volume tangki (ft³)

Karena akan dilakukan pengendalian terhadap suhu pada tangki CSTR maka digunakan variabel suhu maka Persamaan 2.1 dapat dituliskan ke bentuk persamaan berikut

$$f\rho_i C_{pi} T_i(t) - f\rho_o C_{po} T(t) = \frac{d(V\rho_o C_v T(t))}{dt} \quad 2.2$$

dengan,

- C_{pi} = kapasitas panas cairan *inlet* pada tekanan konstan (Btu/lb°F)
- C_{po} = kapasitas panas cairan *outlet* pada tekanan konstan (Btu/lb°F)
- C_v = kapasitas panas cairan pada volum konstan (Btu/lb°F)
- $T_i(t)$ = suhu *inlet* (°F)
- $T(t)$ = suhu *outlet* (°F)

Karena diasumsikan bahwa berat jenis dan kapasitas panas memiliki harga konstan dalam *range* suhu operasi maka Persamaan 2.2 dapat dituliskan seperti berikut:

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f\rho C_p T_i(t) - f\rho C_p T(t) \quad 2.3$$

Persamaan 2.3 merupakan persamaan differensial orde satu yang menunjukkan hubungan antara suhu *inlet* dan suhu *outlet*, di mana Persamaan 2.3 adalah model matematis untuk proses pemanasan pada *continuous stirred tank reactor*. Seperti dibahas sebelumnya bahwa

dikehendaki untuk membentuk suatu fungsi alih yang menghubungkan antara suhu *outlet* $T(t)$ dan suhu *inlet* $T_i(t)$.

Pada pembahasan sebelumnya disampaikan bahwa tangki reaktor diisolasi dengan sempurna, hal ini berarti tidak ada panas yang hilang di sekitar tangki. Akan tetapi, pada pembahasan ini akan ditinjau pengaruh dari suhu sekitar $T_s(t)$. Dengan menggunakan referensi yang sama untuk *enthalpy* dan *internal energy* maka diperoleh persamaan *unsteady state energy balance* yaitu:

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f\rho C_p T_i(t) - q(t) - f\rho C_p T(t) \quad 2.4$$

atau

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f\rho C_p T_i(t) - UA(T(t) - T_s(t)) - f\rho C_p T(t) \quad 2.5$$

dengan:

- $q(t)$ = tingkat transfer panas sekitar (Btu/min)
- U = koefisien transfer panas *overall* (Btu/lb.°F)
- A = luas transfer panas (ft²)
- $T_s(t)$ = suhu sekitar (°F)

Koefisien transfer panas *overall*, U adalah fungsi dari beberapa parameter, seperti suhu dan diasumsikan bernilai konstan karena masa cairan dalam tangki, berat jenis dan volume cairan adalah konstan sehingga luas panas A juga bernilai konstan.

Selanjutnya akan ditinjau variabel simpangan, untuk persamaan *energy balance* pada kondisi awal (*initial condition*) yaitu:

$$f\rho C_p T_i(t) - UA(T(t) - T_s(t)) - f\rho C_p T(t) = 0 \quad 2.6$$

Dengan melakukan operasi pengurangan pada Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6 maka diperoleh persamaan baru seperti berikut:

$$V\rho C_v \frac{d(T(t)-\bar{T})}{dt} = \rho C_p (T_i(t)-\bar{T}_i) - f\rho C_p (T(t)-\bar{T})$$

$$- UA \left((T(t) - T_s(t)) - (T_s - \bar{T}_s) \right) \quad 2.7$$

Beikut juga didefinisikan variabel simpangan sebagai berikut:

$$\Gamma(t) = T(t) - \bar{T} \quad 2.8$$

$$\Gamma_i(t) = T_i(t) - \bar{T}_i \quad 2.9$$

$$\Gamma_s(t) = T_s(t) - \bar{T} \quad 2.10$$

Dengan melakukan substitusi pada Persamaan 2.5-2.10 maka diperoleh bentuk persamaan berikut:

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = f\rho C_p \Gamma_i(t) - UA(\Gamma(t) - \Gamma_s(t)) - f\rho C_p \Gamma(t) \quad 2.11$$

2.1.3 Linearisasi

Sebuah sistem nonlinear dapat dicari solusi penyelesaiannya melalui pendekatan model linear. Dalam hal ini, persamaan-persamaan (model) nonlinear pada sistem terlebih dahulu akan dilakukan linearisasi dengan menggunakan *first-order equation*.

Pada persamaan yang telah diperoleh sebelumnya untuk proses pemanasan pada *continuous stirred tank reactor* didapatkan persamaan *unsteady state energy balance* seperti pada Persamaan 2.4, dari persamaan tersebut selanjutnya akan dilakukan prosedur untuk tahapan linearisasi.

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = f\rho C_p \Gamma_i(t) - UA(\Gamma(t) - \Gamma_s(t)) - f\rho C_p \Gamma(t) \quad 2.12$$

$$\begin{aligned} V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} &= g[\Gamma_i(t), \Gamma_s(t), \Gamma(t)] \\ &= f\rho C_p \Gamma_i(t) - UA(\Gamma(t) - \Gamma_s(t)) - f\rho C_p \Gamma(t) \end{aligned} \quad 2.13$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = f\rho C_p \Gamma_i(t) + UA\Gamma_s(t) - (UA\Gamma + f\rho C_p)\Gamma(t) \quad 2.14$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = a_1 \Gamma_i(t) + a_2 \Gamma_s(t) - a_3 \Gamma(t) \quad 2.15$$

dengan,

$$a_1 = \frac{\overline{dg}}{d\Gamma_i} = f\rho C_p$$

$$a_2 = \frac{\overline{dg}}{d\Gamma_s} = UA$$

$$a_3 = \frac{\overline{dg}}{d\Gamma} = UA + f\rho C_p$$

sehingga diperoleh,

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + a_3 \Gamma(t) = a_1 \Gamma_i(t) + a_2 \Gamma_s(t) \quad 2.16$$

jika kedua ruas dibagi dengan a_3 maka didapat persamaan berikut

$$\frac{V\rho C_v}{a_3} \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + \Gamma(t) = \frac{a_1}{a_3} \Gamma_i(t) + \frac{a_2}{a_3} \Gamma_s(t) \quad 2.17$$

jika diasumsikan

$$\tau = \frac{1}{a_3} = \frac{1}{UA + f\rho C_p} V\rho C_v \quad 2.18$$

$$K1 = \frac{a_1}{a_3} = \frac{f\rho C_p}{UA + f\rho C_p} \quad 2.19$$

$$K2 = \frac{a_2}{a_3} = \frac{UA}{UA + f\rho C_p} \quad 2.20$$

$$\tau \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + \Gamma(t) = K1 \Gamma_i(t) + K2 \Gamma_s(t) \quad 2.21$$

Selanjutnya dilakukan transformasi Laplace maka diperoleh seperti pada Persamaan 2.22

$$\tau s \Gamma(s) + \Gamma(s) = K1 \Gamma_i(s) + K2 \Gamma_s(s)$$

$$(\tau s + 1) \Gamma(s) = K1 \Gamma_i(s) + K2 \Gamma_s(s)$$

$$\Gamma(s) = \frac{K1}{(\tau s + 1)} \Gamma_i(s) + \frac{K2}{(\tau s + 1)} \Gamma_s(s) \quad 2.22$$

Jika suhu sekitar dijaga konstan $T_s(t) = \bar{T}_s$, sehingga $\Gamma_s(t) = 0$ dan fungsi alih yang menghubungkan antara *inlet* dan *outlet* suhu adalah

$$\frac{\Gamma(s)}{\Gamma_i(s)} = \frac{K1}{(\tau s + 1)} \quad 2.23$$

Jika *liquid inlet* suhu dijaga konstan $T_i(t) = \bar{T}_i$, sehingga $\Gamma_i(t) = 0$ dan fungsi alih yang menghubungkan antara suhu proses dan suhu sekitar adalah

$$\frac{\Gamma(s)}{\Gamma_s(s)} = \frac{K2}{(\tau s + 1)} \quad 2.24$$

Jika suhu sekitar dan suhu *inlet* berubah maka Persamaan 2.22 akan menunjukkan hubungan seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.23 dan 2.24, di mana K1 dan K2 merupakan *steady state gain* atau *process gain*.

2.1.4 Proses Pengendalian Suhu *Continuous Stirred Tank Reactor*

Pengendalian suhu pada CSTR sangat penting dilakukan karena bila suhu didalam tangki reaktor terlalu tinggi akan menguraikan produk menjadi komponen-komponen penyusunnya sedangkan jika suhu terlalu rendah akan mengakibatkan produk tidak dapat tercampur dengan sempurna.

Untuk mempertahankan suhu dalam tangki CSTR dapat dilakukan dengan mengalirkan *steam* yang dilewatkan pada sebuah koil/pipa yang terpasang didalam tangki tersebut atau dengan mensirkulasi *condensate* melalui alat penukar panas. Suatu kontroler dirancang untuk mengendalikan aliran/flow *steam* kedalam tangki hingga mencapai nilai suhu kerja yang diinginkan.

Tabel 2.1 Parameter *Plant Continuous Stirred Tank Reactor*

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1.	<i>Heat Transfer Area</i>	A	241,5	ft ²
2.	<i>Heat Capacity of Coil</i>	C_m	265,7	Btu/°F
3.	Kapasitas Panas <i>steam</i>	C_v	2,1	Btu/lb.°F
4.	Kapasitas Panas <i>liquid</i>	C_p	0,80	Btu/lb.°F
5.	Koef. Transfer Panas <i>overall</i>	U	2,1	Btu/lb.°F
6.	<i>Transmitter time constant</i>	τ_T	0,75	Min
7.	<i>Valve time constant</i>	τ_V	0,20	Min
8.	Penguatan aliran <i>steam</i>	K_W	1,905	°F/(ft ³ /min)
9.	<i>Gain valve</i>	K_V	1,652	(lb/min)/%CO
10.	<i>Gain transmitter</i>	K_T	1,0	%TO/°F

Jika kesalahan sensor yang terjadi menyebabkan suhu reaktor yang semakin tinggi atau suhu diatas kondisi *steady state* maka proses pencampuran akan sangat berbahaya jika tetap dioperasikan. Contohnya dapat menyebabkan terjadi reaksi penguraian atau jika dalam produksi *propylene glycol* dapat terjadi evaporasi.

2.1.4.1 Kondisi Proses [3]

Pembentukan asam formiat merupakan reaksi hidrolisa yang dilakukan dengan mereaksikan metil formiat dengan air. Reaksi yang terjadi merupakan reaksi endotermis dan dilakukan dalam reaktor CSTR. Reaksi ini berlangsung pada kondisi suhu 80 °C atau 176 °F dan tekanan 3 atm. Suhu kerja proses yang diperbolehkan pada pembuatan Asam Formiat ini tidak melebihi *range* suhu kerja proses, yaitu 176-185 °F.

Peralatan utama dalam pabrik asam formiat ialah reaktor jenis *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) dengan peralatan pendukungnya terdiri dari tangki penyimpanan, pompa, *heat exchanger*. Proses Hidrolisa Metil format ditunjukkan dalam reaksi kimia seperti berikut,



2.1.4.2 Kondisi Desain [3]

Dalam Tugas Akhir ini dirancang suatu kontrol proses pengendalian suhu pada suatu tangki reaktor dengan spesifikasi desain seperti berikut:

Liquid yang dialirkan ke dalam tangki memiliki berat jenis (ρ) adalah 60,9375 lb/ft³, kapasitas panas *liquid* adalah 0,80 Btu/lb°F. Volume (V) fluida dalam tangki reaktor dijaga tetap pada 120 ft³.

Koil terdiri dari pipa dengan panjang 205 ft, jenis pipa adalah *schedule* 40 dengan diameter 4 inch, berat pipa adalah 10,8 lb/ft dan kapasitas panas 0,12 Btu/lb°F dan diameter luar pipa adalah 4,5 inch. Koefisien transfer panas *overall* didasarkan pada luas koil/pipa bagian luar dan destimasi sebesar 2,1 Btu/lb°F.

Steam yang dipergunakan pada proses ini pada kondisi saturasi pada tekanan 30 psia, hal ini diasumsikan bahwa panas *latent* kondensasi (λ) bernilai konstan pada 966 btu/lb. Selain itu diasumsikan juga bahwa suhu *inlet* (T_i) bernilai konstan.

Sifat-sifat fisis dan kimia bahan baku dan produk:

1. Metil formiat

Sifat fisis

Rumus molekul	: C ₂ H ₄ O ₂ atau HCOOCH ₃
Berat molekul	: 60,053
Titik leleh	: -99°C / -146,2°F
Titik didih	: 31,9°C / 89,42°F
Tekanan kritis	: 59,98 bar
Berat jenis (ρ)	: 0,975 gr/ml

Sifat kimia

Dengan penambahan *anhydrous ammonia* dalam campuran akan membentuk formamida yang kemudian dengan asam sulfat (75% berat dalam air) membentuk ammonium formiat.

2. Air

Sifat fisis

Rumus molekul	: H ₂ O
Berat molekul	: 18
Titik leleh	: 0°C / 32°F
Titik didih	: 100°C / 212°F
Tekanan kritis	: 217,6 atm
Berat jenis	: 0,9941 gr/ml

Sifat kimia

Bersifat normal pada pH 7, Dapat menguraikan garam menjadi asam dan basa (hidrolisis).

3. Asam formiat (produk)

Sifat fisis

Rumus molekul	: CH_2O_2 atau HCOOH
Berat molekul	: 46
Titik leleh	: $8,4^\circ\text{C}$ / $47,12^\circ\text{F}$
Titik didih	: $100,8^\circ\text{C}$ / $213,44^\circ\text{F}$
Berat jenis	: 1,22647 gr/ml

Sifat kimia

Mereduksi hidroksimetil amina menjadi senyawa amina, serta Bereaksi dengan olefin dengan adanya hidrogen peroksida membentuk glikol formiat.

Debit aliran *liquid* (f) diberikan tetap pada $15 \text{ ft}^3/\text{min}$ dengan suhu inlet (T_i) *liquid* adalah 100°F . Suhu isi tangki reaktor harus dijaga tetap pada suhu kerja terbaik, yaitu 176°F . Diasumsikan gangguan sistem yang akan dianalisa berupa kesalahan kalibrasi pengukuran sensor pada saat satu kali proses. Parameter-parameter fisik CSTR ditunjukkan pada Tabel 2.1.

2.2 Fault Tolerance [4]

Fault tolerance system adalah suatu sistem yang dapat melanjutkan tugasnya dengan benar meskipun terjadi kegagalan perangkat keras (*hardware failure*) dan kesalahan perangkat lunak (*software error*). Ada tiga istilah pokok dalam rancangan fault tolerance yaitu, *fault*, *error*, dan *failure*.

Ada tiga bentuk teknik utama usaha memperbaiki atau memelihara unjuk kerja normal sistem yaitu: *fault avoidance*, *fault masking*, dan *fault tolerance*.

1. Fault avoidance

Fault avoidance adalah teknik yang digunakan untuk mencegah fault pada tempat yang pertama. *Fault avoidance* dapat termasuk hal-hal seperti: tinjauan design, penyaringan komponen, testing dan lain sebagainya.

2. Fault masking

Fault masking adalah proses yang mencegah kerusakan dalam sistem dari error yang masuk ke dalam susunan informasi dari sistem tersebut.

3. *Fault tolerance*

Fault tolerance adalah kemampuan sistem untuk melanjutkan tugasnya setelah terjadinya kerusakan. Sasaran pokok *fault tolerance* adalah mencegah kegagalan (*failure*) sistem.

Sistem kontrol toleransi kesalahan merupakan sistem kontrol yang mengkoordinasikan redundansi untuk meningkatkan kehandalan. Salah satu pendekatan terhadap tujuan ini adalah untuk memasukkan redundansi sehingga jika komponen dalam sistem terdapat suatu kesalahan, sistem akan mentolerir kesalahan tersebut.

Dalam kontrol toleransi kesalahan terdapat tiga jenis utama yang dikenali sebagai suatu kesalahan yaitu kesalahan aktuator, kesalahan sensor dan kesalahan *plant*. Aktuator dan sensor biasanya dimodelkan sebagai sinyal eksternal yang ditambahkan pada sinyal yang nominal (kesalahan *additif*). Sementara itu, kesalahan *plant* berhubungan dengan penurunan performa sistem. Suatu kesalahan juga dapat dikategorikan berdasarkan tipe kesalahan yang terjadi, yaitu *abrupt* dan *incipient*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.

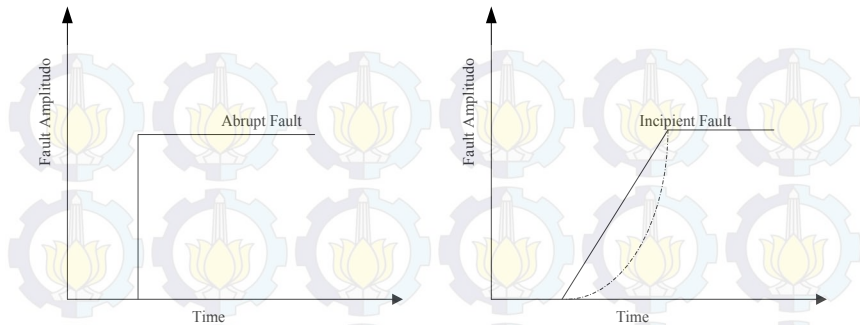
Efek dari kesalahan *abrupt* biasanya pengaruhnya terlihat jelas karena sistem akan menunjukkan perubahan yang tak terduga. Hal ini dapat menyebabkan seluruh sistem gagal.

Dalam kesalahan sensor, ketika sensor mengalami kegagalan maka dalam pembacaan pengukuran menghasilkan nilai nol. Untuk memastikan keandalan kerja sistem kontrol, kesalahan *abrupt* dalam komponen sistem tidak dapat ditoleransi dan harus terdeteksi pada saat melakukan pemeliharaan.

Situasi ini berbeda dengan kesalahan *incipient*. Efek dari kesalahan *incipient* pada sistem adalah sangat kecil dan hampir tidak dapat dilihat selama tahap permulaan/ kesalahan yang baru terjadi (*incipient*).

Kesalahan *incipient* memiliki efek yang lebih rendah dan dapat berkembang secara perlahan untuk menimbulkan efek yang lebih besar dan sangat serius pada sistem meskipun kesalahan ini dalam permulaan masih mungkin ditoleransi ketika kesalahan sensor tersebut pertama kali terdeteksi.

Suatu kesalahan sensor didefinisikan sebagai *unpermitted deviation*/ penyimpangan yang tidak diperbolehkan setidaknya terdapat satu sifat karakteristik variabel dari perilaku yang tidak dapat diterima.



Gambar 2.2 Perilaku Kesalahan Sensor (*Abrupt and Incipient*)

Kesalahan pada sensor yang sering terjadi adalah kesalahan statik, seperti kesalahan dalam hal akurasi atau kepresisian suatu sensor yang dapat disebabkan kesalahan dalam melakukan kalibrasi terhadap sensor.

2.2.2 Identifikasi Mode Kegagalan [5]

Mode kegagalan dapat diidentifikasi antara lain dengan pemeriksaan komponen (*hardware approach*) atau fungsi sistem. Mode kegagalan merupakan perilaku yang dapat diamati kegagalan suatu komponen.

Untuk setiap mode kegagalan dibuat suatu penilaian mengenai kemungkinan penyebabnya. Berikut ini terdapat beberapa contoh spesifik mode kegagalan:

- *Abnormal stress*: ini biasanya dipengaruhi oleh lingkungan luar.
- *Mechanical stress*: getaran yang terus-menerus mungkin dapat menyebabkan kehilangan perlengkapan pendukungnya.
- *Contamination*: kotoran dapat menyebabkan kegagalan listrik.
- *Evaporation*: usia dari filament dapat menyebabkan filament tersebut mengalami evaporasi (penguapan).
- *Fatigue*: perubahan fisik menyebabkan pada material menyebabkan kepatahan pada akhirnya.
- *Friction*: ini sebagai penyebab umum kegagalan pada *belts*, *gear* dan seluruh mesin pada umumnya.
- *Corrosion*: proses kimia ini yang dapat menyebabkan material melemah.

- *Suhu cycling*: ekspansi dan konstruksi berulang-ulang menyebabkan material melemah.
- *Aging and wearout*: ini bukan penyebab utama tetapi dapat mencerminkan sebab lainnya yang akan terjadi.
- *Substandard or defective parts*: ini mencerminkan kurangnya *quality control* selama proses pembuatan.
- *Operator or maintenance-induced error*: ini disebabkan oleh kesalahan manusia.

2.2.3 Kategori Kesalahan [5]

Sebuah kesalahan didefinisikan sebagai bentuk deviasi *unpermitted* atau perilaku yang tidak dapat diterima. Oleh karena itu, kesalahan adalah sebuah *state* yang dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada suatu sistem. Kesalahan yang terjadi dalam proses produksi umumnya terdapat pada aktuator, *plant* dan sensor, dalam Tugas Akhir ini kesalahan yang akan diamati pada sistem di fokuskan pada bentuk kesalahan kalibrasi/pengukuran pada sensor.

Dampak dari setiap kegagalan/kesalahan pada setiap operasi atau proses produksi akan dilakukan suatu penilaian/pengukuran. Pengaruh kesalahan yang terjadi dimulai dari *range* kegagalan sistem secara keseluruhan atau degradasi parsial hingga kesalahan yang terjadi tidak berpengaruh terhadap performansi sistem. Ketika kegagalan terjadi dalam unit *redundant*, performansi sistem tidak akan berpengaruh secara tiba-tiba tetapi akan menyebabkan keandalan sistem akan berkurang.

Tabel 2.2 Klasifikasi Tingkat Keparahan Kegagalan

Tingkat Kesalahan	Kategori	Keterangan
Kategori IV	<i>Negligible</i>	Terjadi kegagalan kecil: tidak berpengaruh terhadap kinerja sistem
Kategori III	<i>Marginal</i>	Sistem terdegradasi dengan beberapa penurunan terhadap performa sistem
Kategori II	<i>Critical</i>	Terjadi kegagalan sistem secara keseluruhan: kinerja sistem tidak dapat diterima
Kategori I	<i>Catastrophic</i> / Bahaya	Kegagalan sistem yang signifikan dan tidak dapat ditoleransi

Variasi dari tingkat keparahan kegagalan suatu sistem dapat dilakukan pengkategorian dengan melakukan suatu identifikasi untuk setiap dampak kesalahan yang terjadi. Klasifikasi tingkat keparahan ditentukan untuk setiap masing-masing mode kegagalan yang nantinya digunakan sebagai dasar untuk menentukan peringkat/urutan dalam memberikan tindakan korektif atau suatu kompensasi terhadap bentuk kesalahan yang terjadi. Salah satu klasifikasi mode kegagalan secara umum ditunjukkan pada Tabel 2.2

2.3 Kontroler PID [6]

Kontroler merupakan salah satu komponen system yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal referensi menjadi sinyal kontrol sedemikian rupa sehingga performansi dari sistem yang dikendalikannya sesuai dengan spesifikasi performansi yang diinginkan.

Kontroler PID merupakan kontroler feed-forward yang berfungsi mengolah sinyal error menjadi sinyal kontrol, di mana hubungan sinyal kontrol terhadap sinyal error dapat proporsional, integral, diferensial atau gabungan diantaranya. Berdasarkan bentuk hubungan sinyal error dan sinyal kontrol, kontroler ini dibedakan atas beberapa tipe, antara lain:

2.3.1 Kontroler Tipe-P

Hubungan sinyal error dan sinyal kontrol pada kontroler tipe-P dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$u(t) = K_p e(t) + u_b \quad 2.25$$

atau dalam bentuk *transfer function*

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad 2.26$$

Kontroler tipe P berfungsi untuk mempercepat suatu respon di mana hubungan *gain* K_p terhadap kecepatan respon. Sifat dari kontroler P ini berbanding terbalik dengan *error* yang terjadi. Sedangkan untuk bentuk fungsi alih hubungan keluaran sistem terhadap *error* ditunjukkan pada Persamaan 2.27

$$\frac{C(s)}{E(s)} = \frac{K_p K}{\tau s + 1} \quad 2.27$$

untuk nilai $K=1$, maka dapat diperoleh fungsi alih pada Persamaan 2.28

$$\frac{C(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad 2.28$$

Dari *transfer function* diatas dapat dilihat hubungan antara nilai K_p dengan τ (*time constant*), di mana τ (*time constant*) menentukan cepat lambat-nya suatu respon yang dapat dibuktikan dengan nilai *rise time* (T_r) = $\tau \ln 9$, semakin tinggi nilai K_p maka τ semakin kecil sehingga respon semakin cepat, begitu juga sebaliknya.

2.3.2 Kontroler Tipe-PI

Hubungan sinyal error dan sinyal kontrol pada kontroler tipe-PI dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt] \quad 2.29$$

atau dalam bentuk *transfer function*

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p(\tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad 2.30$$

Penambahan parameter I (*integral*) pada kontroler PI berfungsi untuk menghilangkan *error stedy state* karena kontroler proporsional ditambah *integral* merupakan konntroler yang aksi kontrolernya mempunyai sifat proporsional dan *integral* terhadap sinyal kesalahan (*error*).

2.3.3 Kontroler Tipe-PD

Hubungan sinyal error dan sinyal kontrol pada kontroler tipe-PD dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$u(t) = K_p[e(t) + \tau_D \frac{d}{dt} e(t)] \quad 2.31$$

atau dalam bentuk *transfer function*

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(\tau_D s + 1) \quad 2.32$$

Dari persamaan diatas konstanta $\tau_D s$ sebagai fungsi redaman terhadap overshoot suatu respon. Karena overshoot hanya terjadi pada fungsi integral maka untuk meredam overshoot tersebut digunakan fungsi differential sebagai *reverse* dari fungsi integral. Sehingga jika nilai konstanta defferential sama dengan atau lebih besar dari pada nilai konstanta integral maka osilasi/ *overshoot* dari respon tersebut akan menjadi teredam.

2.3.4 Kontroler Tipe-PID

Hubungan sinyal eror dan sinyal kontrol pada kontroler tipe-PID secara umum dapat dinyatakan sebagai pada Persamaan 2.33

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt}] \quad 2.33$$

Kontroler tipe PID merupakan gabungan dari ketiga parameter P-I-D dengan memiliki keunggulan dan kekurangan dari masing-masing parameter, dengan melakukan *tuning* parameter yang tepat akan didapatkan respon kerja terbaik.

2.4 Teori Logika Fuzzy [7]

Sebelum munculnya teori logika *fuzzy*, dikenal logika tegas (*crisp logic*) yang memiliki nilai benar atau salah secara tegas, sedangkan dalam teori logika *fuzzy*, sebuah nilai dapat bernilai benar dan salah secara bersamaan dan besar nilai benar dan salah tergantung kepada bobot (derajat) keanggotaan yang dimilikinya. Teori *fuzzy* memiliki kelebihan yaitu kemampuan dalam proses penalaran secara bahasa.

Gambar 2.3 memperlihatkan derajat keanggotaan yang dimiliki oleh himpunan *fuzzy* bervariasi antara 0 hingga 1, berbeda dengan logika tegas yang hanya memiliki nilai 0 atau 1.

2.4.1 Himpunan Fuzzy

Dalam teori logika *fuzzy* dikenal himpunan *fuzzy* (*fuzzy set*) yang merupakan pengelompokan objek berdasarkan variabel bahasa (linguistik) yang dinyatakan dalam fungsi keanggotaan. Dalam semesta pembicaraan (*universe of discourse*) U, fungsi keanggotaan dari suatu himpunan *fuzzy* tersebut bernilai antara 0,0-1,0 seperti pada Gambar 2.3.

2.4.2 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan mendefinisikan bagaimana setiap titik pada semesta pembicaraan (nilai tegas) dipetakan menjadi bobot atau derajat keanggotaan antara 0 dan 1. Jika A merupakan himpunan *fuzzy*, μ_A adalah fungsi keanggotaan dan X adalah semesta, maka fungsi keanggotaan dalam suatu himpunan *fuzzy* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in X\} \quad 2.34$$

Fungsi keanggotaan suatu himpunan *fuzzy* dapat ditentukan dengan fungsi segitiga, trapesium, Gaussian, *Generalized Bell*, dan bentuk lainnya.

2.4.2.1 Fungsi Keanggotaan Segitiga

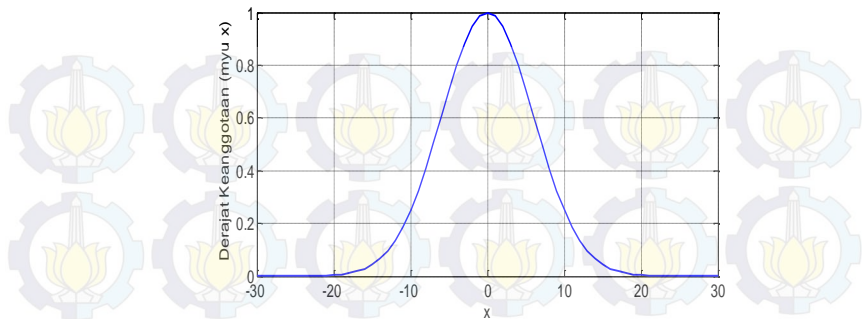
Fungsi keanggotaan segitiga seperti pada Gambar 2.4 bergantung pada tiga parameter skalar $\{a, b, c\}$ dengan $a < b < c$. Secara matematis, derajat keanggotaan untuk fungsi keanggotaan segitiga ditentukan dengan Persamaan 2.35.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad 2.35$$

2.4.2.2 Fungsi Keanggotaan Trapesium

Persamaan fungsi keanggotaan trapesium (*trapezoid*) dengan empat parameter skalar $\{a, b, c, d\}$ dengan $a < b < c < d$. Fungsi keanggotaan trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.5. Derajat keanggotaannya dituliskan sebagai berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases} \quad 2.36$$



Gambar 2.3 Penggambaran Logika *Fuzzy*

2.4.2.3 Fungsi Keanggotaan *Gaussian*

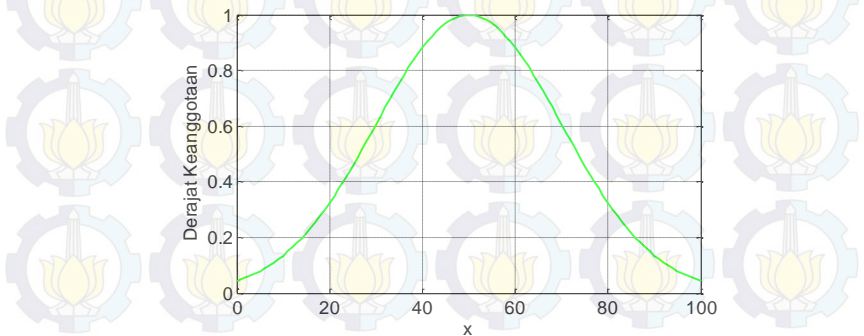
Fungsi keanggotaan *Gaussian* seperti pada Gambar 2.6 ditentukan oleh dua parameter $\{c, \sigma\}$, dan derajat keanggotaannya ditentukan sebagai berikut,

$$\mu(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad 2.37$$

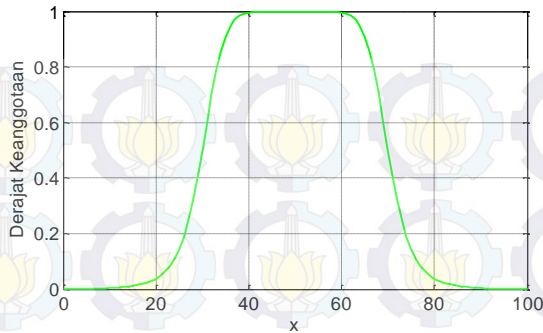
dengan c merepresentasikan pusat fungsi keanggotaan dan σ (standar deviasi) mendefinisikan lebar fungsi keanggotaan.

2.4.2.4 Fungsi Keanggotaan *Generalized Bell*

Fungsi keanggotaan *Generalized Bell* seperti pada Gambar 2.7 ditentukan oleh tiga parameter $\{a, b, c\}$, dan derajat keanggotaannya ditentukan oleh Persamaan 2.38.



Gambar 2.4 Fungsi Keanggotaan *Gaussian*



Gambar 2.5 Fungsi Keanggotaan *Generalized Bell*

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad 2.38$$

2.4.3 Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan *fuzzy* dilakukan dengan manipulasi fungsi keanggotaan satu dengan lainnya. Operasi himpunan *fuzzy* A dan B dinyatakan dengan keanggotaan masing-masing dinyatakan dalam $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(x)$. Pada Gambar 2.8 terdapat himpunan *fuzzy* A dan B yang akan dilakukan operasi himpunan *fuzzy*.

Pada Gambar 2.9 adalah dua himpunan *fuzzy* dalam semesta pembicaraan X dengan fungsi keanggotaan μ_A dan μ_B untuk $x \in X$, maka operasi himpunan *fuzzy* didefinisikan sebagai berikut:

1. Union (OR)

Union (gabungan) dari himpunan *fuzzy* A dan B dengan fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(x)$ adalah $\mu_{A \cup B}(x)$.

a. Maximum

Untuk semua $x \mid x \in X$, operasi *maximum* dinyatakan seperti berikut:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad 2.29$$

b. Algebraic Sum

Untuk semua $x \in X$, hasil *algebraic sum* dari dua himpunan *fuzzy* A dan B adalah sebagai berikut:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \quad 2.30$$

2. Interseksi (AND)

Interseksi himpunan *fuzzy* A dan B adalah himpunan *fuzzy* yang fungsi keanggotaannya diberikan sebagai berikut:

a. Minimum

Operasi *minimum* dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X \quad 2.31$$

b. Algebraic product

Algebraic product dari dua himpunan *fuzzy* A dan B dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), x \in X \quad 2.32$$

3. Komplemen (NOT)

Komplemen dari suatu himpunan *fuzzy* B dengan fungsi keanggotaan $\mu_B(x)$ adalah:

$$\mu_{B'}(x) = 1 - \mu_B(x) \text{ untuk } x \in X \quad 2.33$$

Hasil operasi himpunan *fuzzy* dari himpunan A dan B pada Gambar 2.8 diperlihatkan pada Gambar 2.9 sampai dengan Gambar 2.11.

2.4.4 Sistem Inferensi Fuzzy

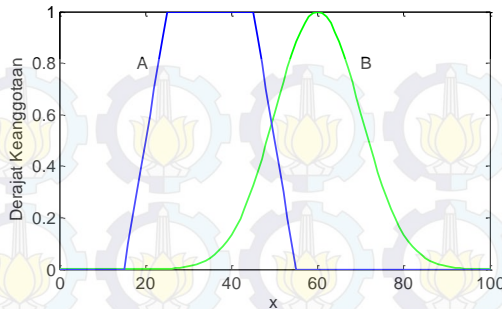
Inferensi logika *fuzzy* mempunyai kemiripan dengan penalaran manusia, di mana inferensi *fuzzy* terdiri atas:

- Pengetahuan (*knowledge*), meliputi penalaran *fuzzy* yang dinyatakan sebagai aturan dalam bentuk pernyataan **If-Then** seperti berikut:

If premis **Then** konsekuen
If $x_1 = A$ AND $x_2 = B$ **Then** $u = C$

dengan x_1 , x_2 dan u adalah variabel *fuzzy*; A, B, dan C adalah fungsi keanggotaan *fuzzy*. AND adalah logika penghubung (operator).

- Fakta merupakan masukan *fuzzy* yang akan dicari inferensinya dengan menggunakan aturan *fuzzy*.
- Konklusi adalah hasil inferensi yang sesuai yang diperoleh berdasarkan fakta *fuzzy* dan basis pengetahuan *fuzzy*.



Gambar 2.6 Himpunan *Fuzzy* A dan B

Dalam kontroler *fuzzy* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12, terdapat empat komponen penting, yaitu:

1. Basis aturan, yang berisi sejumlah aturan *fuzzy* (*If-Then*) yang memetakan nilai input *fuzzy* menjadi nilai keluaran *fuzzy*.
2. Mekanisme inferensi, berisi tentang prosedur untuk melakukan inferensi.
3. Fuzzifikasi, untuk menentukan derajat keanggotaan dari setiap variabel input tegas.
4. Defuzzifikasi, memetakan hasil inferensi *fuzzy* menjadi output tegas.

Mekanisme inferensi untuk menentukan keputusan dalam suatu sistem (kontroler) *fuzzy* adalah sebagai berikut:

1. Fuzzifikasi input

Pemetaan input tegas menjadi input *fuzzy* dengan menentukan derajat keanggotaannya dalam semua himpunan *fuzzy* menggunakan fungsi keanggotaannya masing-masing.

2. Aplikasi operator *fuzzy*

Penerapan operator *fuzzy* (seperti *AND*, *OR*) pada bagian premis dari aturan *fuzzy*.

3. Aplikasi implikasi

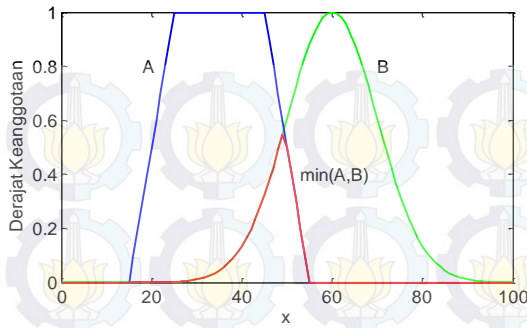
Proses mendapatkan konsekuen dari aturan (*If-Then*) berdasarkan derajat keanggotaan premis.

4. Agregasi

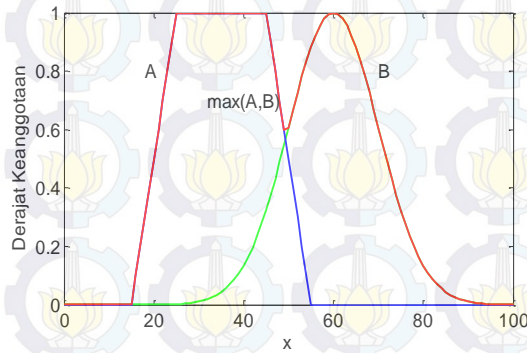
Proses mengkombinasikan keluaran semua aturan (*If-Then*) menjadi sebuah *fuzzy* set tunggal.

5. Defuzzifikasi

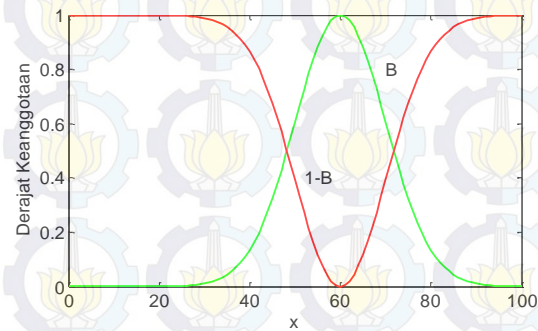
Perhitungan konklusi *fuzzy* menjadi output tegas.



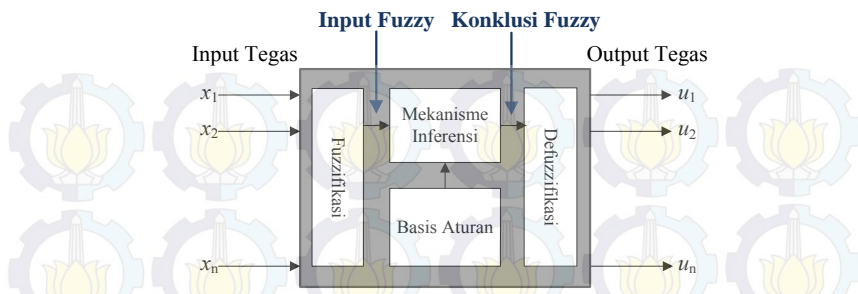
Gambar 2.7 Operasi *Min* pada Himpunan Fuzzy A dan B



Gambar 2.8 Operasi *Max* pada Himpunan Fuzzy A dan B



Gambar 2.9 Operasi *Not* pada Himpunan Fuzzy A dan B



Gambar 2.10 Kontroler *Fuzzy*

Beberapa metode defuzzifikasi yang sering digunakan diantaranya adalah *center of gravity*, dan *center (weighted) average*.

Metode defuzzifikasi dengan *center of gravity* dapat diterapkan pada fungsi keanggotaan yang simetris. Dengan b_i merupakan titik tengah fungsi keanggotaan, r menyatakan banyaknya aturan *fuzzy* dan $\int \mu_{(i)}$ merupakan area di bawah fungsi keanggotaan, maka output tegas yang dihasilkan:

$$u^{\text{tegas}} = \frac{\sum_{i=1}^r b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_{i=1}^r \int \mu_{(i)}} \quad 2.44$$

Metode defuzzifikasi lain yang digunakan pada fungsi keanggotaan yang simetris adalah *center (weighted) average* atau rerata berbobot dengan b_i merupakan titik tengah fungsi keanggotaan dan μ_i adalah bobot hasil aplikasi operator *fuzzy*, maka output tegas yang dihasilkan:

$$u^{\text{tegas}} = \frac{\sum_{i=1}^r b_i \mu_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i} \quad 2.45$$

Sistem inferensi *fuzzy* dapat dibangun dengan dua metode, yaitu metode Mamdani dan metode Sugeno. Dalam mekanisme inferensi, perbedaan sistem inferensi *fuzzy* tipe Mamdani dan Sugeno terletak pada jenis fungsi keanggotaan yang digunakan pada bagian konsekuensi.

Dalam tipe Mamdani, output tegas hasil proses inferensi diperoleh dengan operasi *max-min* atau *max-product*. Gambar 2.13 memperlihatkan

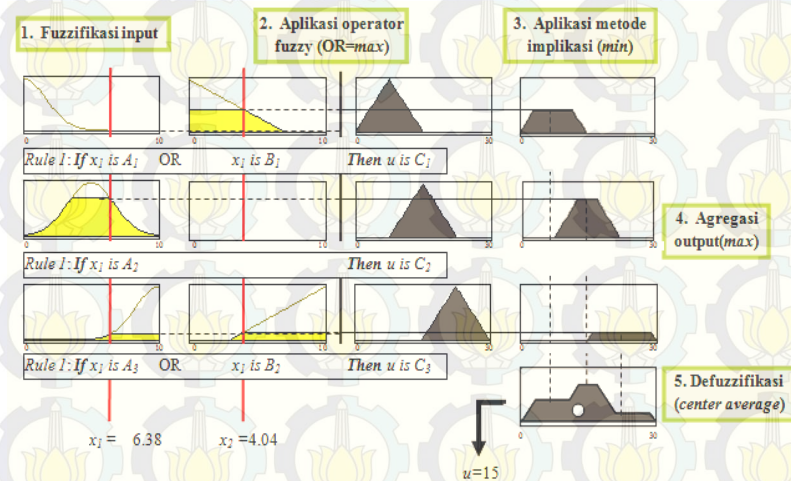
proses inferensi *fuzzy* dengan *max-min* dan Gambar 2.14 memperlihatkan proses inferensi *fuzzy* dengan *max-product*.

Sistem inferensi *fuzzy* Sugeno seperti pada Gambar 2.15 menggunakan fungsi keanggotaan output yang bersifat linear atau konstan. Aturan **If-Then** dalam sistem inferensi *fuzzy* tipe Sugeno berbentuk seperti berikut:

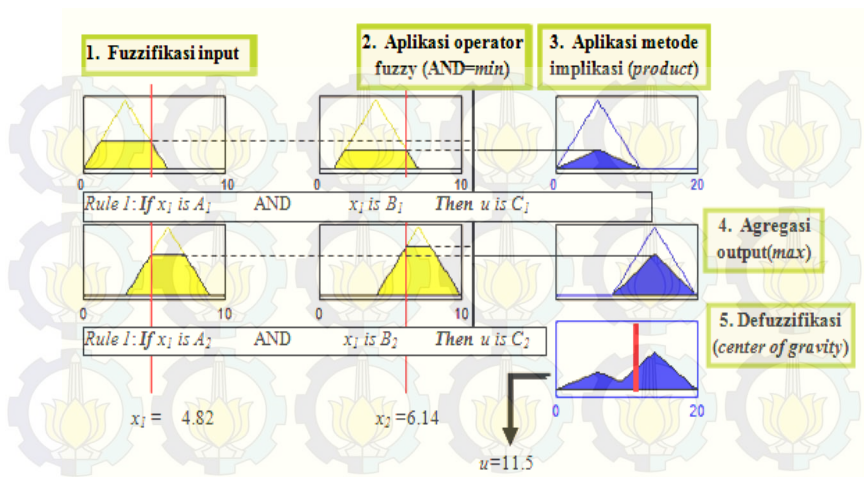
$$\text{If } x_1 = A \text{ AND } x_2 = B \text{ Then } u = f(x, y)$$

Keluaran dari aturan bukan dalam bentuk fungsi keanggotaan, tetapi sebuah bilangan yang berubah secara linear terhadap variabel-variabel input yang mengikuti persamaan $u=f(x,y)$. Jika $f(x,y)$ polinomial orde satu, maka sistem inferensi *fuzzy* yang dihasilkan adalah model *fuzzy* Sugeno orde satu. Jika $f(x,y)$ konstan diperoleh model *fuzzy* Sugeno orde satu (dapat dipandang sebagai kasus khusus sistem inferensi *fuzzy* Mamdani dengan bagian konsekuen dari aturan dispesifikasikan sebagai *fuzzy singleton*).

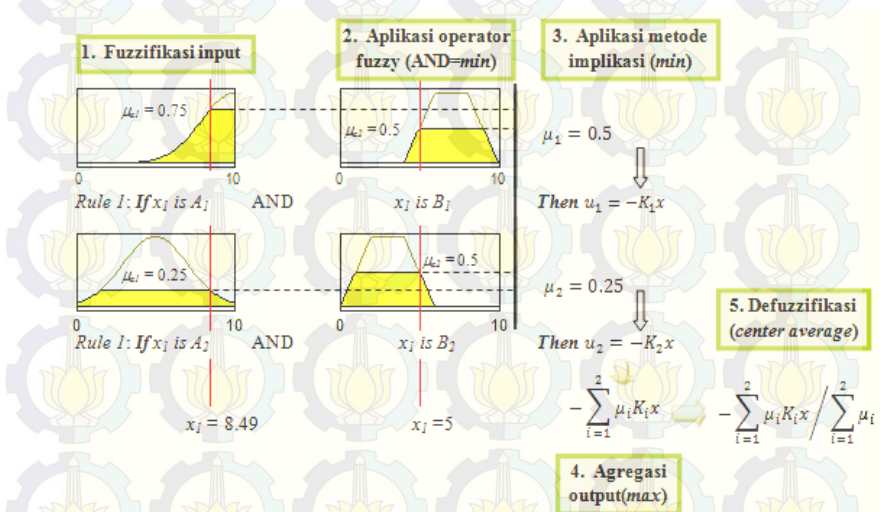
Fuzzy singleton adalah himpunan *fuzzy* A yang mempunyai fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ bernilai nol kecuali pada satu titik input x , misalkan pada Gambar 2.16, $x=0$, sehingga $\mu_A(0) = 1$.



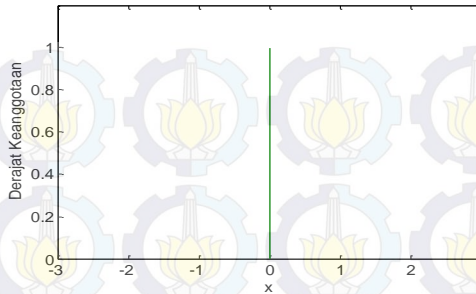
Gambar 2.11 Inferensi *Fuzzy* Mamdani dengan *Max-min*



Gambar 2.12 Inferensi Fuzzy Mamdani dengan Max-product



Gambar 2.13 Inferensi Fuzzy Sugeno dengan Metode Defuzzifikasi Center Average



Gambar 2.14 *Fuzzy Singleton*

2.5 *Fuzzy PD* [8]

Lebih dari 90% kontroler yang digunakan dalam industri saat ini adalah kontroler PID. Hal ini dikarenakan kontroler PID mudah dimengerti dan mudah diimplementasikan. Kontroler PID hanya dapat digunakan dengan baik untuk parameter *plant* dan kondisi operasi yang tetap. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme penalaan yang dapat menyesuaikan dengan perubahan parameter *plant* dan kondisi operasi sistem.

Tindakan Derivatif membantu untuk memprediksi kesalahan dan kontroler proporsional-derivatif menggunakan aksi kontrol derivative untuk meningkatkan kestabilan pada kontrol *loop* tertutup.

Mekanisme struktur kontroler *fuzzy PD* ditunjukkan pada Gambar 2.15, di mana masukan *fuzzy PD* berupa *error* (*e*) dan *delta error* (*de*). Apabila terjadi perbedaan, kontroler *fuzzy* akan melakukan mekanisme penalaan *gain* pada sinyal kontrol (*Ku*) agar didapatkan sistem yang stabil. Keluaran kontroler pada kontrol *fuzzy PD* ditunjukkan pada Persamaan 2.46.

$$u_n = f(Ke * e_n, KdE * de) * Ku \quad 2.46$$



Gambar2.15 Struktur Kontroler *Fuzzy PD*

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

Pada Bab ini berisi penjelasan mengenai linearisasi model matematika *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR). Setelah diperoleh model-model linear lokal, dilakukan perancangan kontroler untuk sistem pemanasan produk pada CSTR. Selain itu juga akan dirancang suatu kontroler untuk setiap model kesalahan sensor menggunakan pendekatan model *Fuzzy PD*. Dalam bab ini, juga akan ditunjukkan blok diagram Simulink MATLAB untuk simulasi perancangan kontrol toleransi kesalahan sensor pada sistem CSTR.

3.1 Pemodelan State Continuous Stirred Tank Reactor

Pemodelan *state* pada *plant* CSTR dilakukan dengan cara menurunkan persamaan matematis, di mana persamaan tersebut menggambarkan dinamika pada tangki reaktor, berikut beberapa persamaan matematis pada proses pengendalian suhu dalam tangki CSTR.

Pertama, kesetimbangan energi pada *liquid* didalam tangki reaktor diperoleh dengan memberikan asumsi bahwa panas yang hilang diabaikan dan *liquid* tercampur dengan sempurna. Dari asumsi tersebut maka diperoleh seperti Persamaan 2.5 sebagai berikut,

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f(t)\rho C_p T_i + UA(T_s(t) - T(t)) - f(t)\rho C_p T(t) \quad 3.1$$

dengan,

A = luas transfer panas (ft^2)

$T_s(t)$ = suhu *steam* kondensat ($^{\circ}\text{F}$)

Liquid yang ada didalam *continuous stirred tank reactor* memiliki harga kapasitas panas cairan pada volume konstan adalah sama dengan kapasitas panas cairan pada tekanan konstan sehingga diasumsikan bahwa C_v sama dengan C_p .

Kedua, kesetimbangan energi pada koil/pipa diperoleh dengan asumsi bahwa koil/pipa memiliki suhu yang sama dengan *steam* kondensat sehingga diperoleh bentuk persamaan seperti berikut,

$$C_M \frac{d(T_s(t))}{dt} = w(t)\lambda - UA(T_s(t) - T(t)) \quad 3.2$$

dengan,

$w(t)$ = masa aliran *steam* (lb/min)

C_M = kapasitas panas koil/pipa (Btu/°F)

Dari persamaan kesetimbangan energi diatas, jika diasumsikan $x_1 = T(t)$, $x_2 = T_s(t)$; $u_1 = f(t)$, $u_2 = w(t)$ maka Persamaan 3.1 dan 3.2 dapat dituliskan kembali dalam bentuk persamaan *state* seperti pada Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4

- Kesetimbangan energi pada *liquid*:

$$\begin{aligned} V\rho C_v \frac{d(x_1)}{dt} &= u_1\rho C_p T_i + UA(x_2 - x_1) - u_1\rho C_p x_1 \\ V\rho C_v \dot{x}_1 &= u_1\rho C_p T_i + UA x_2 - UA x_1 - u_1\rho C_p x_1 \\ \dot{x}_1 &= \frac{u_1\rho C_p T_i + UA x_2 - UA x_1 - u_1\rho C_p x_1}{V\rho C_v} \end{aligned} \quad 3.3$$

- Kesetimbangan energi pada koil/pipa:

$$\begin{aligned} C_M \frac{d(x_2)}{dt} &= u_2\lambda - UA(x_2 - x_1) \\ C_M \dot{x}_2 &= u_2\lambda - UA x_2 + UA x_1 \\ \dot{x}_2 &= \frac{u_2\lambda - UA x_2 + UA x_1}{C_M} \end{aligned} \quad 3.4$$

Dengan memasukkan nilai-nilai dari parameter *plant* yang telah diberikan pada Tabel 2.1 kedalam Persamaan 3.3 dan 3.4 maka didapatkan nilai-nilai untuk model nonlinear *plant* dalam bentuk persamaan *state* seperti berikut,

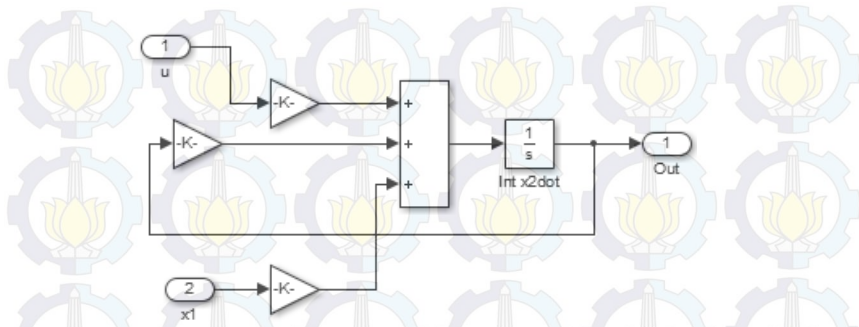
$$\dot{x}_1 = -0,57795x_1 + 0,57795x_2 + 5,56u_1 - 0,0556x_1u_1 \quad 3.5$$

3.6

Didalam Gambar 3.1 terdapat *subsystem* untuk x1dot, x2dot, di mana detail *subsystem-subsystem* tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3



Gambar Error! No text of specified style in document..2 Diagram *Simulink* Subsystem *x1dot*



Gambar Error! No text of specified style in document..3 Diagram *Simulink* Subsystem *x2dot*

3.2 Perancangan Kontroler

Salah satu fungsi kontroler adalah untuk meminimalkan/menghilangkan kesalahan yaitu perbedaan antara nilai *setpoint* dan nilai actual dari suatu sistem. Kesalahan yang terjadi dapat disebabkan oleh adanya gangguan/*disturbance* ataupun kesalahan dari suatu pengukuran.

3.2.1 Perancangan Kontroler PID

Dalam menentukan parameter kontrol PID dapat dilakukan dalam beberapa cara, antara lain dengan mencari bentuk *transfer function* dari *plant* yang akan di kontrol atau dengan melakukan identifikasi *open loop* dengan memberikan sinyal uji dan kemudian melakukan analisa statis dari hasil respon keluaran yang dihasilkan.

Dari kondisi-kondisi yang telah diberikan pada subbab 2.14 maka dapat ditentukan bentuk fungsi alih hasil linearisasi model matematika untuk *plant* CSTR seperti berikut,

- Persamaan Kestimbangan Energi Cairan dalam Tangki

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f(t)\rho C_p T_i + UA(T_s(t) - T(t)) - f(t)\rho C_p T(t) \quad 3.7$$

- Persamaan Kestimbangan Energi *Thermal* pada koil/pipa

$$C_M \frac{d(T_s(t))}{dt} = w(t)\lambda - UA(T_s(t) - T(t)) \quad 3.8$$

dengan,

A = luas transfer panas (ft^2)

$T_s(t)$ = suhu *steam* kondensat

$w(t)$ = masa aliran *steam* (lb/min)

C_M = kapasita panas koil/pipa ($\text{Btu/}^\circ\text{F}$)

Proses linearisasi kesetimbangan energi dalam tangki reaktor CSTR:

- Untuk persamaan kesetimbangan energi cairan dalam tangki

$$V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} = f(t)\rho C_p T_i - UA(T(t) - T_s(t)) - f(t)\rho C_p T(t)$$

$$\begin{aligned} V\rho C_v \frac{d(T(t))}{dt} &= g[f(t), T_s(t), T(t)] \\ &= F(t)\rho C_p \bar{T}_i - UA(\Gamma(t) - \Gamma_s(t)) - F(t)\rho C_p \Gamma(t) \end{aligned} \quad 3.9$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = F(t)\rho C_p \bar{T}_i(t) + UA\Gamma_s(t) - (UA\Gamma + F(t)\rho C_p)\Gamma(t)$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} = a_1 F(t) + a_2 \Gamma_s(t) - a_3 \Gamma(t) \quad 3.10$$

dengan,

$$a_1 = \frac{dg}{dF} = \rho C_p \bar{T}_i - \rho C_p \bar{T}$$

$$a_2 = \frac{dg}{d\Gamma_s} = UA$$

$$a_3 = \frac{dg}{d\Gamma} = UA + \bar{f}\rho C_p$$

sehingga,

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + a_3 \Gamma(t) = a_1 F(t) + a_2 \Gamma_s(t)$$

kedua ruas dibagi dengan a_3 maka didapat persamaan berikut,

$$\frac{V\rho C_v}{a_3} \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + \Gamma(t) = \frac{a_1}{a_3} \Gamma_i(t) + \frac{a_2}{a_3} \Gamma_s(t) \quad 3.11$$

jika diasumsikan sseperti pada Persamaan 2.18-2.20 maka didapatkan Persamaan 3.12

$$\tau_I \frac{d(\Gamma(t))}{dt} + \Gamma(t) = KIF(t) + K2\Gamma_s(t) \quad 3.12$$

dengan melakukan transformasi Laplace maka diperoleh persamaan berikut

$$\tau_I s \Gamma(s) + \Gamma(s) = KIF(s) + K2\Gamma_s(s)$$

$$(\tau_I s + 1) \Gamma(s) = KIF(s) + K2\Gamma_s(s)$$

$$\Gamma(s) = \frac{KI}{(\tau_I s + 1)} F(s) + \frac{K2}{(\tau_I s + 1)} \Gamma_s(s) \quad 3.13$$

- Untuk persamaan kesetimbangan energi *thermal* pada *coil/ tube*

$$C_M \frac{d(T_s(t))}{dt} = w(t)\lambda - UA(T_s(t) - T(t)) \quad 3.14$$

$$\begin{aligned} V\rho C_v \frac{d(T_s(t))}{dt} &= g[w(t), T_s(t), T(t)] \\ &= W(t)\lambda - UA(\Gamma_s(t) - \Gamma(t)) \end{aligned} \quad 3.15$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma_s(t))}{dt} = W(t)\lambda - UA\Gamma_s(t) + UA\Gamma(t)$$

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma_s(t))}{dt} = a_1 W(t) - a_2 \Gamma_s(t) + a_3 \Gamma(t) \quad 3.16$$

dengan,

$$a_1 = \frac{\overline{dg}}{dW} = \lambda$$

$$a_2 = \frac{\overline{dg}}{d\Gamma_s} = UA$$

$$a_3 = \frac{\overline{dg}}{d\Gamma} = UA$$

sehingga didapat,

$$V\rho C_v \frac{d(\Gamma_s(t))}{dt} + a_2 \Gamma_s(t) = a_1 F(t) + a_2 \Gamma(t) \quad 3.17$$

jika kedua ruas dibagi dengan a_2 maka didapat persamaan berikut,

$$\frac{V\rho C_v}{a_2} \frac{d(\Gamma_s(t))}{dt} + \Gamma_s(t) = \frac{a_1}{a_2} \Gamma_i(t) + \frac{a_3}{a_2} \Gamma(t) \quad 3.18$$

jika diasumsikan,

$$\tau_2 = \frac{1}{a_2} = \frac{1}{UA} V\rho C_v$$

$$K3 = \frac{a_1}{a_2} = \frac{\lambda}{UA}$$

$$K4 = \frac{a_3}{a_2} = \frac{UA}{UA} = 1$$

maka diperoleh Persamaan 3.18

$$\tau_2 \frac{d(\Gamma_s(t))}{dt} + \Gamma_s(t) = K3 W(t) + K4 \Gamma(t) \quad 3.18$$

dengan melakukan transformasi Laplace pada Persamaan 3.18 maka diperoleh persamaan berikut,

$$\tau_2 s \Gamma_s(s) + \Gamma_s(s) = K3 F(s) + K4 \Gamma(s)$$

$$(\tau_2 s + 1) \Gamma_s(s) = K3 W(s) + K4 \Gamma(s)$$

$$\Gamma(s) = \frac{K3}{(\tau_2 s + 1)} W(s) + \frac{K4}{(\tau_2 s + 1)} \Gamma(s) \quad 3.19$$

Dengan melakukan substitusi pada Persamaan 3.19 ke Persamaan 3.13 maka didapatkan bentuk persamaan seperti berikut,

$$\begin{aligned} \Gamma(s) &= \frac{K1}{(\tau_1 s + 1)} F(s) + \frac{K2}{(\tau_1 s + 1)} \left[\frac{K3}{(\tau_2 s + 1)} W(s) + \frac{K4}{(\tau_2 s + 1)} \Gamma(s) \right] \\ \Gamma(s) &= \frac{K1(\tau_2 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) - K2K4} F(s) \\ &\quad + \frac{K2K3}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) - K2K4} W(s) \end{aligned} \quad 3.20$$

sehingga didapatkan bentuk fungsi alih yang menyatakan suatu hubungan seperti berikut,

- Fungsi Alih yang menyatakan hubungan antara keluaran suhu ($T(s)$) terhadap perubahan aliran/ *flow feed* ($F(s)$)

$$\frac{\Gamma(s)}{F(s)} = \frac{K1(\tau_2 s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) - K2K4} \quad 3.21$$

- Fungsi Alih yang menyatakan hubungan antara keluaran suhu ($T(s)$) terhadap perubahan suhu *steam* ($W(s)$)

$$\frac{\Gamma(s)}{W(s)} = \frac{K2K3}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) - K2K4} \quad 3.22$$

Jika nilai parameter *plant* dimasukkan kedalam persamaan 3.21 dan 3.22 maka didapatkan fungsi alih system seperti pada Persamaan 3.23:

$$G_f(s) = \frac{-2,992(1,7303s+1)}{1,227s^2+2,44s+0,5905} = \frac{-5,177s-2,992}{1,227s^2+2,44s+0,5905}$$

dan

$$G_s(s) = \frac{0,78}{1,227s^2 + 2,44s + 0,5905} \quad 3.23$$

Dari fungsi alih yang telah di peroleh hasil linearisasi pada persamaan 3.23 maka dapat ditentukan parameter PI yang sesuai untuk mendapatkan respon sistem seperti yang diinginkan.

Bentuk *plant orde-2* tanpa delay:

$$\frac{K}{\frac{1}{w_n^2}s^2 + \frac{2\zeta}{w_n}s + 1} \quad 3.24$$

Karena akan dilakukan pengendalian suhu keluaran sistem, maka dari bentuk fungsi alih *plant* $G_s(s)$ pada Persamaan 3.23 maka dapat dicari parameter-parameter kontrol PI seperti berikut,

$$w_n = \sqrt{\frac{1}{1,227}} = 0,9028, \quad \zeta = \frac{2,44 \cdot (0,9028)}{2} = 1,1014$$

$$\tau_i = \frac{2\zeta}{w_n} = \frac{2 \cdot 1,1014}{0,9028} = 2,44$$

Kriteria respon yang diharapkan pada pengendalian suhu CSTR adalah memiliki $T_s^* (\pm 0,5\%) = 2$ dt, Maka diperoleh nilai K_p sebagai berikut,

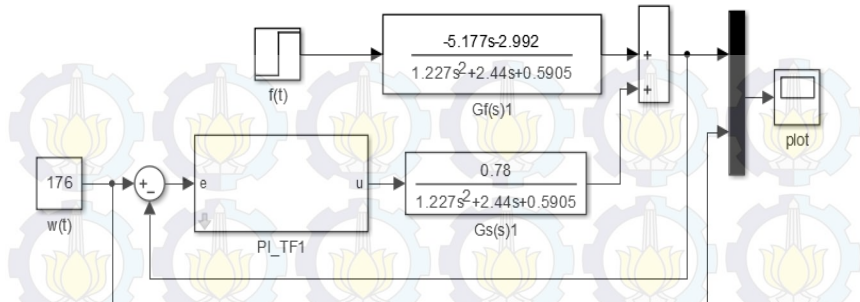
$$T_s^* (\pm 0,5\%) = 2 \text{ dt}$$

$$5\tau^* = 2 \rightarrow \tau^* = 0,4$$

Dari nilai tersebut diperoleh nilai K_p seperti berikut,

$$K_p = \frac{\tau_i \tau^* (w_n)^2}{K}$$

$$K_p = \frac{0,79544}{0,78} = 1,0198$$

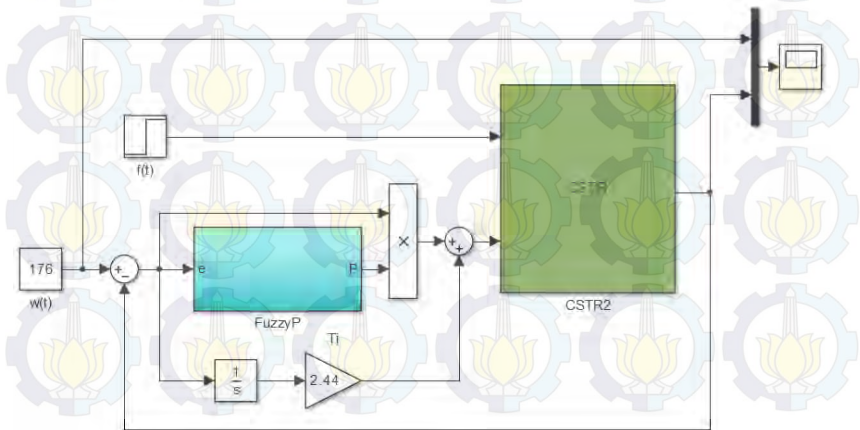


Gambar Error! No text of specified style in document..4 Diagram Block Simulink Kontrol PI

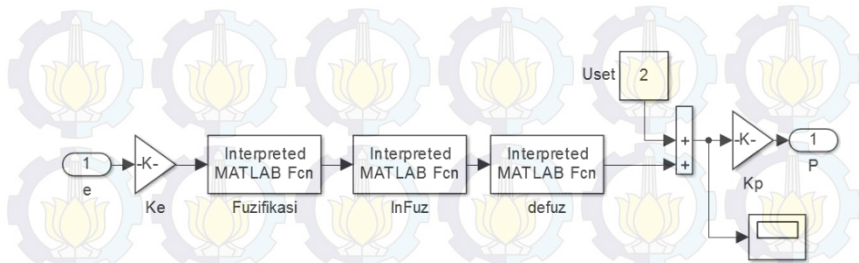
Sehingga didapatkan parameter kontrol PID untuk bentuk fungsi alih pada Persamaan 3.23 adalah $K_p = 1,10198$; $\tau_i = 2,44$ dan untuk diagram kontrol pada Simulink ditunjukkan pada Gambar 3.4

3.2.2 Perancangan Kotreler Fuzzy PI

Logika fuzzy merupakan pengembangan dari logika Boolean [0, 1]. Pada perancangan kontrol fuzzy PI, Fungsi keanggotaan untuk masukan fuzzy berupa nilai error seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pada Gambar 3.5 perancangan kontrol fuzzy PI dibuat dengan menggabungkan kontroler fuzzy P ditambah dengan kontrol integral, dimana diagram block untuk fuzzy P ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar Error! No text of specified style in document..**5** *Diagram Block Simulink Fuzzy PI Controller*



Gambar Error! No text of specified style in document..**6** *Subsystem Kontrol Fuzzy P*

Tabel Error! No text of specified style in document..**1** *Basis Aturan Fuzzy PI*

u	error						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	M	M	N	N	N	B	B

Dalam perancangan kontrol *fuzzy* ini, sebagai masukan nilai *error*, digunakan 7 fungsi himpunan keanggotaan yang direpresentasikan dalam logika verbal {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}. Sedangkan untuk keluaran sinyal kontrol (*u*) memiliki 3 fungsi himpunan keanggotaan yang direpresentasikan dalam {M, N, B}, dengan M adalah minimum, N adalah nominal dan B adalah Big. Basis aturan yang digunakan dalam proses inferensi *fuzzy* ditunjukkan pada Tabel 3.1.

3.2.3 Perancangan Kontroler *Fuzzy* PD

Ada beberapa tahapan yang harus dilakukan dalam perancangan kontroler *Fuzzy* PD ini, antara lain: fuzzifikasi, inferensi *fuzzy* dan defuzzifikasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7

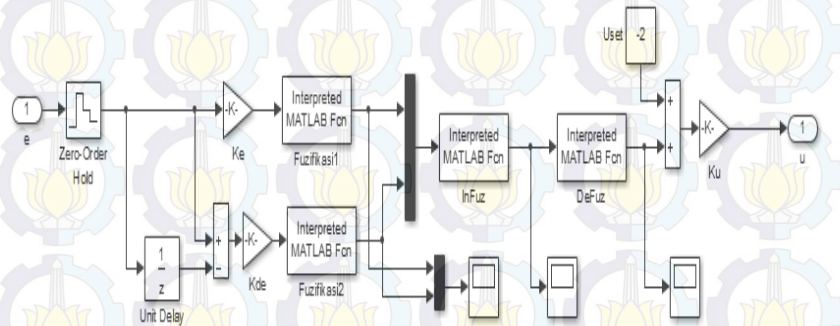
3.3.2.1 Fuzzifikasi

Tahapan fuzzifikasi merupakan tahapan di mana terjadi proses pengubahan nilai *crisp* ke dalam nilai *fuzzy*. Dalam perancangan fuzzifikasi pada Tugas Akhir ini digunakan 5 fungsi keanggotaan masukan *fuzzy*, di mana bentuk fungsi keanggotaan yang digunakan berupa segitiga ternormalisasi dengan range $\{-2 - 2\}$ dan

direpresentasikan dalam suatu variabel verbal {NB, NS, Z, PS, PB} seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Nilai hasil proses fuzzifikasi ditentukan berdasarkan derajat keanggotaannya, di mana rumusan yang digunakan untuk menentukan derajat keanggotaan ditunjukkan pada Persamaan 2.35. Secara program algoritma dalam menentukan derajat keanggotaan *fuzzy* ditunjukkan pada *flowchart* Gambar 3.10

3.3.2.2 Inferensi Fuzzy Sistem

Sistem inferensi *fuzzy* mendefinisikan aturan-aturan yang berupa pengetahuan yang biasanya direpresentasikan dalam bentuk logika verbal *If premis1 AND premis2 Then konsekuensi*



Gambar Error! No text of specified style in document..7 Block Simulink Fuzzy PD

Pada perancangan ini terdapat dua aturan premis, dimana premis1 berupa *error* (e) dan premis2 adalah delta *error* (de) sedangkan sebagai konsekuensinya berupa sinyal kontrol (u).

Aturan/*rule base* digunakan sebagai kompensasi untuk memberikan sinyal kontrol, dalam perancangan ini *rule base* yang dibuat berdasarkan pada aturan yang didefinisikan dalam suatu tabel yaitu tabel *mac vicar wheelan*, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

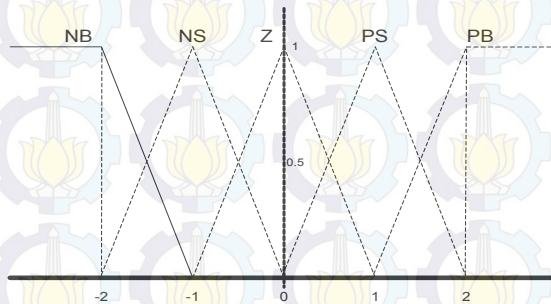
Sedangkan relasi himpunan dalam proses inferensi *fuzzy* dalam kontrol *fuzzy* PD digunakan fungsi *max-min* dari nilai-nilai *error* dan *delta error*, untuk menentukan nilai derajat keanggotaan dari suatu aturan *fuzzy*.

3.3.2.3 Defuzzifikasi

Setelah tahapan inferensi dilakukan kemudian dilanjutkan pada tahapan defuzzifikasi untuk mendapatkan nilai tegas (*crisp*) yang akan digunakan dalam proses kontrol.

Tabel Error! No text of specified style in document..2 Basis Aturan *Fuzzy* PD

u		error				
		NB	NS	Z	PS	PB
$\Delta error$	NB	NB	NB	NS	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB



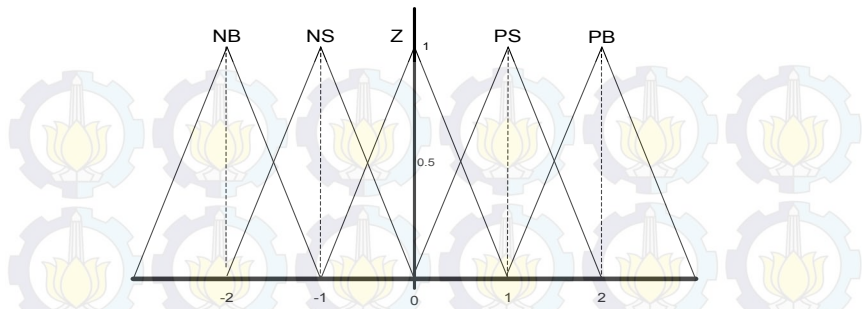
Gambar Error! No text of specified style in document..8 Fungsi Keanggotaan Segitiga Ternormalisasi

Pada tahapan defuzzifikasi diberikan *range* untuk keluaran sinyal kontrol u adalah 5 fungsi keanggotaan dengan bentuk fungsi keanggotaan berupa segitiga ternormalisasi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9

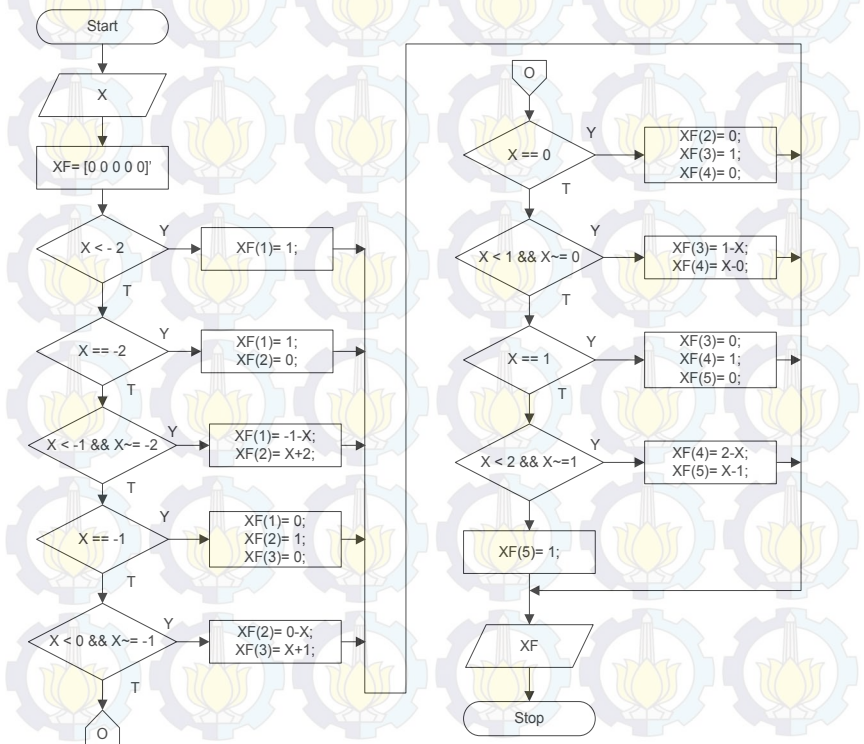
Pada proses defuzzifikasi terdapat beberapa metode untuk mengubah suatu nilai *fuzzy* ke bentuk nilai tegasnya. Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini digunakan metode defuzzifikasi *center (weighted) average* atau rerata berbobot seperti ditunjukkan pada Persamaan 3.27.

$$u^{tegas} = \frac{\sum_{i=1}^5 b_i \mu_i}{\sum_{i=1}^5 \mu_i} \quad 3.27$$

dengan b_i adalah titik tengah fungsi keanggotaan dan μ_i adalah bobot hasil aplikasi operator *fuzzy*.



Gambar Error! No text of specified style in document. 9 Fungsi Keanggotaan Keluaran Segitiga Ternormalisasi



Gambar Error! No text of specified style in document..10 *Flowchart* Proses Fuzzifikasi

3.3 Pengkategorian Kesalahan Sensor

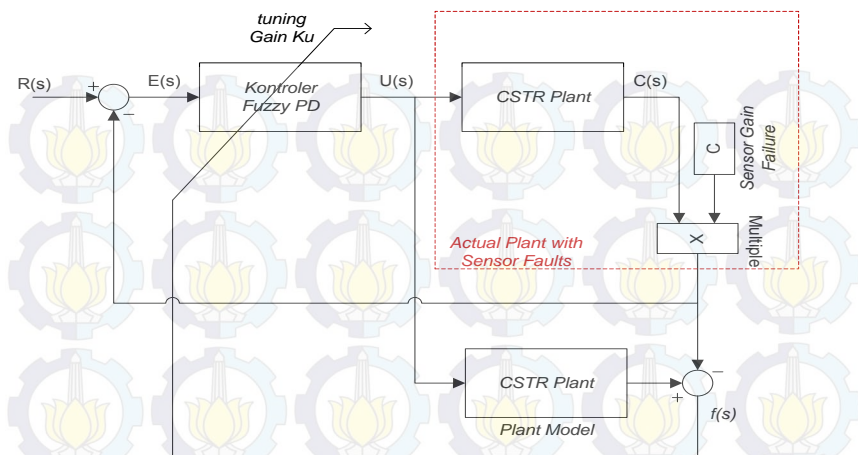
Pengaturan suhu pada proses CSTR sangat penting dilakukan agar suhu didalam CSTR sesuai dengan suhu kerja dari proses yang berlangsung. Karena jika terjadi perubahan sedikit saja dapat mengakibatkan proses pencampuran di dalam CSTR menjadi gagal atau tidak sesuai dengan yang diinginkan seperti yang dijelaskan pada subbab 3.1. Dalam Tugas Akhir ini dibahas pengaruh kesalahan pengukuran dari sensor terhadap keluaran suhu CSTR. Kesalahan sensor yang terjadi diasumsikan merupakan kesalahan pengukuran/kalibrasi dari sensor yang direpresentasikan sebagai perubahan penguatan dari *gain* sensor *feedback*, di mana penguatan nilai *gain feedback* sensor yang diberikan seperti pada Persamaan 3.28

$$0 < K_T < 1 \quad 3.28$$

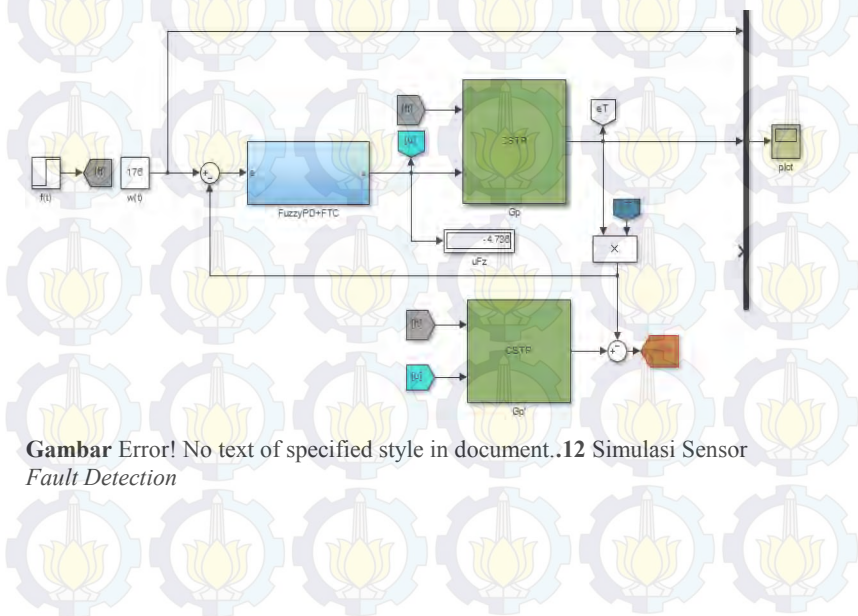
Dalam perancangan Tugas Akhir ini deteksi kesalahan dilakukan secara simulasi dengan melakukan pengukuran *error* untuk setiap perubahan *gain* sensor dengan membandingkan struktur kontrol dengan *gain* sensor normal ($K_T = 1$) dengan *gain* sensor *failure* ($K_T = 0$) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11.

Struktur kontrol pada Gambar 3.11 merupakan struktur untuk melakukan deteksi terhadap kesalahan sensor yang terjadi. Proses deteksi kesalahan ini dibuat dengan metode *model-based*, di mana G_p adalah *actual plant* dengan *gain* kesalahan pada sensor dan G_p' adalah Model *plant*. Prasyarat yang paling penting untuk pendekatan ini adalah model *plant* yang digunakan harus secara akurat menggambarkan *plant* yang sebenarnya, $G_p' = G_p$. Model *plant* dapat diperoleh dari penurunan persamaan dinamis *plant* secara analitis atau melalui pemodelan *black box*.

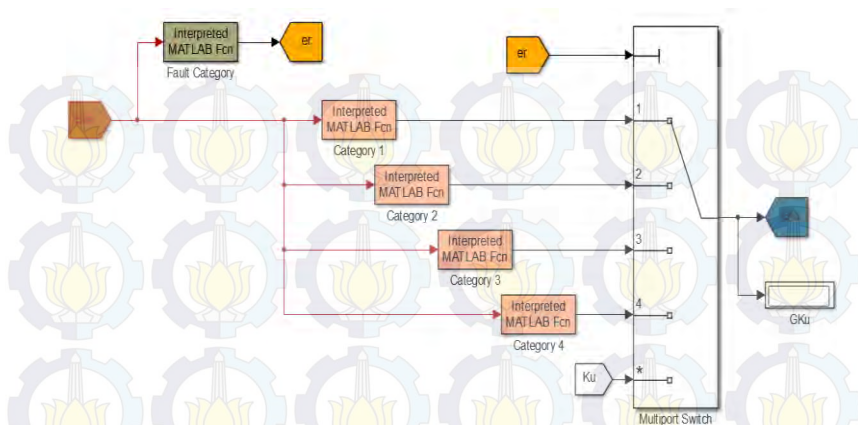
Dari Gambar 3.11 kemudian disimulasikan untuk mendapatkan nilai *error* atau kesalahan pada sensor serta besar kesalahan/*error* pada sistem. Data pengukuran pengaruh kesalahan sensor terhadap *error* sistem kemudian dibuat suatu skenario kesalahan. Simulasi dilakukan dengan membuat struktur *diagram block* di *Simulink* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar Error! No text of specified style in document..11 Struktur Deteksi Kesalahan Sensor



Gambar Error! No text of specified style in document..12 Simulasi Sensor Fault Detection



Gambar Error! No text of specified style in document..13 *Fault Tolerant Scenario*

Tabel Error! No text of specified style in document..3 *Katagori Kesalahan Sensor*

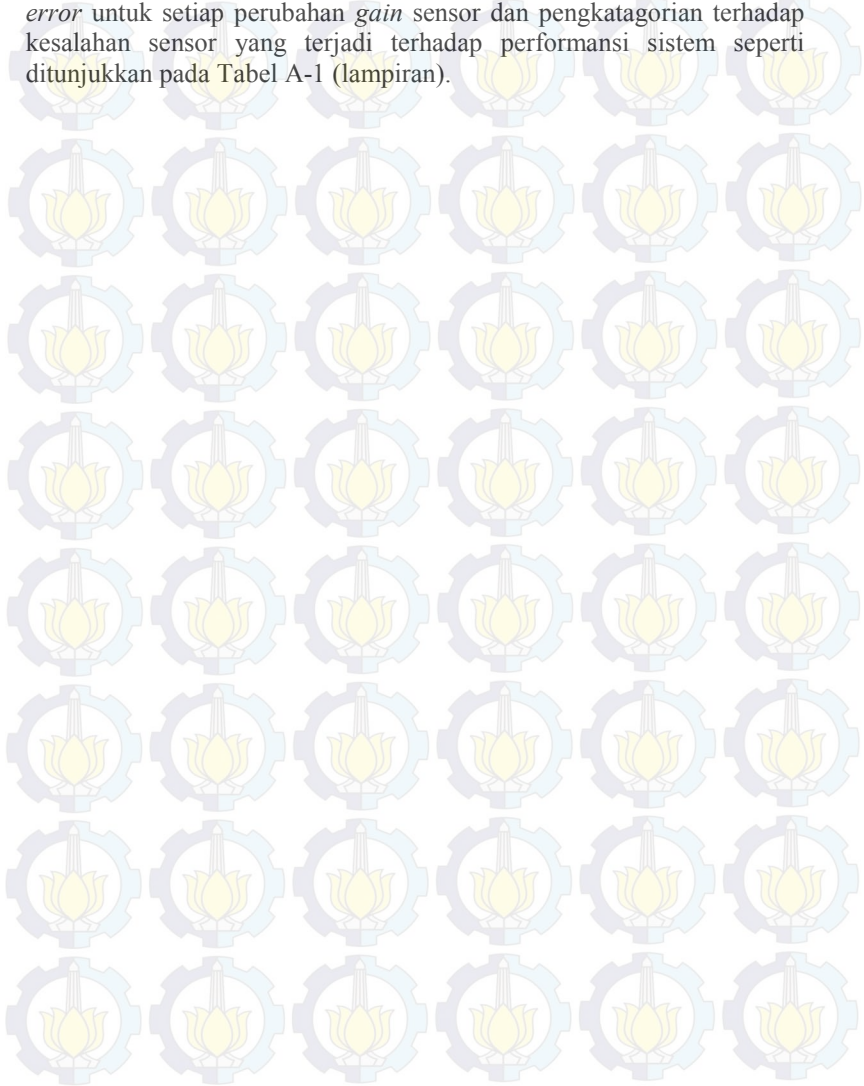
Tingkat Kesalahan	<i>Error Steady State</i> (% e_{ss})	Keterangan
Kategori IV	$e_{ss} < 1,25$	<i>Negligible</i>
Kategori III	$1,25 \leq e_{ss} < 2,5$	<i>Marginal</i>
Kategori II	$2,5 \leq e_{ss} < 5$	<i>Critical</i>
Kategori I	$e_{ss} \geq 5$	<i>Cathastropic</i>

Pada Tabel 3.3, pengkategorian kesalahan yang dibuat dalam perancangan ini didasarkan pada besar nilai kesalahan sensor yang terdeteksi. Nilai kesalahan sensor tersebut berpengaruh terhadap performansi sistem, semakin besar nilai kesalahan sensor yang terdeteksi maka *error steady state* sistem juga semakin besar sehingga dapat menyebabkan kegagalan proses.

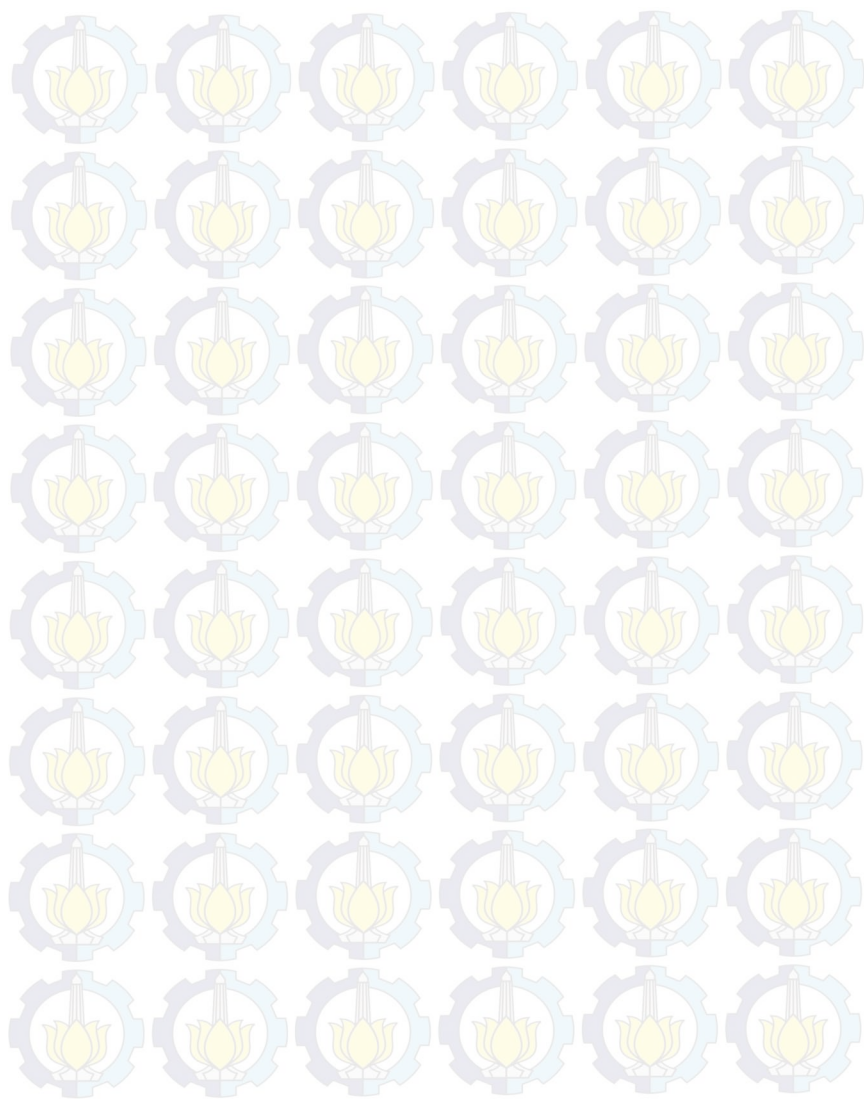
Dari pengkategorian kesalahan tersebut kemudian dilakukan perancangan suatu skenario kesalahan sensor untuk mengkompensasi kesalahan/error yang terjadi. Skenario kesalahan sensor tersebut digunakan untuk menentukan nilai penguatan dari *gain* sinyal kontrol fuzzy PD, di mana *gain* sinyal kontrol tersebut digunakan untuk mengkompensasi kesalahan sensor yang terjadi. Perancangan skenario *fault tolerant* ditunjukkan seperti pada Gambar 3.13.

Pada Gambar 3.13 ditunjukkan bahwa setiap kesalahan sensor yang terdeteksi digolongkan dalam kategori-kategori tertentu. Setiap kategori

kesalahan memiliki *gain* sinyal kontrol yang berbeda-beda untuk mengkompensasi kesalahan sensor yang terjadi. Data hasil pengukuran *error* untuk setiap perubahan *gain* sensor dan pengkatagorian terhadap kesalahan sensor yang terjadi terhadap performansi sistem seperti ditunjukkan pada Tabel A-1 (lampiran).



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



BAB 4

HASIL SIMULASI

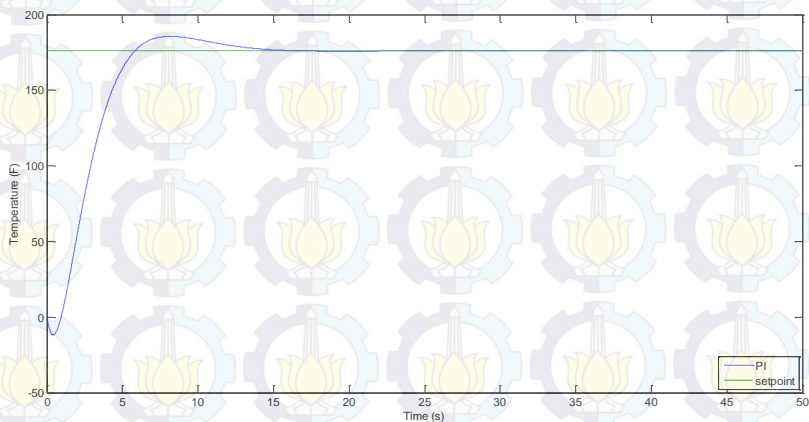
Pada pembahasan berikut ini merupakan hasil percobaan simulasi untuk kontrol toleransi kesalahan, di mana konsep dan diagram simulasi menggunakan Simulink Matlab yang telah dibahas dalam perancangan sistem yang terdapat dalam Bab III.

4.1 Hasil Simulasi CSTR *Plant* Sistem Linear

Pada simulasi *plant* CSTR untuk sistem linear digunakan bentuk fungsi alih. Fungsi alih *plant* diperoleh dari hasil penurunan dan linearisasi dari persamaan matematis *plant* CSTR.

Simulasi *plant* CSTR dikatakan baik jika respon keluaran suhu tangki mampu mengikuti perubahan nilai *setpoint* yang diberikan. Nilai referensi yang diberikan dalam simulasi *plant* CSTR didasarkan dari suhu kerja yang diinginkan yaitu sebesar sebesar 176 °F.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan hasil simulasi sistem dengan memberikan aliran/*flow liquid* sebesar 15 ft³/min. Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa respon sistem telah stabil dan mampu mencapai nilai *setpoint*/suhu kerja yang diinginkan. Selain itu respon suhu keluaran sistem pada Gambar 4.1 memiliki nilai *overshoot* yang cukup kecil yaitu sebesar 5,455 %.



Gambar Error! No text of specified style in document..1 Respon Suhu Keluaran CSTR Sistem Linear

4.2 Hasil Simulasi CSTR *Plant* Sistem Nonlinear

Sistem nonlinear untuk *plant* CSTR didapatkan dari penurunan model dinamis *plant* seperti yang telah dijelaskan pada subbab 3.2.

4.2.1 Simulasi Sistem Nonlinear dengan Kontrol PI

Sistem nonlinear pada *plant* CSTR disimulasikan dengan menggunakan kontrol PI untuk menjaga kestabilan suhu kerja dalam tangki yaitu pada 176 °F untuk setiap perubahan aliran/ *flow* produk yang masuk kedalam tangki reaktor seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kontrol PI respon suhu keluaran pada tangki reaktor CSTR dapat mencapai nilai *setpoint*/ suhu kerjanya serta memiliki nilai *overshoot* yang cukup besar yaitu sebesar 7,33 %.

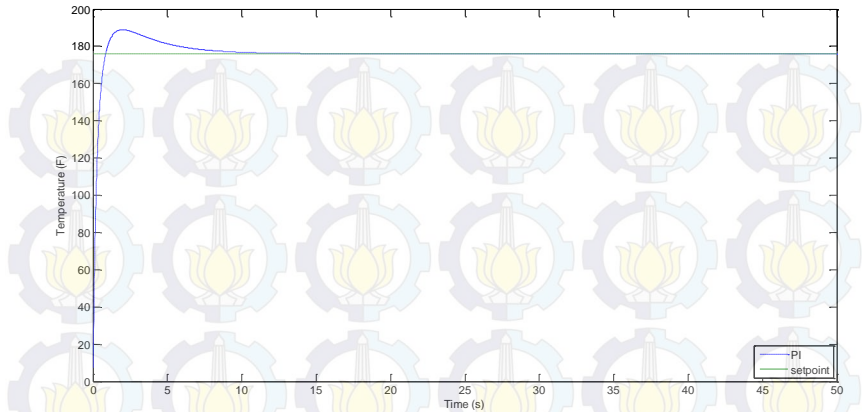
4.2.2 Simulasi Sistem Nonlinear dengan Kontrol Fuzzy PI

Dalam perancangan kontrol Fuzzy PI seperti yang ditunjukkan pada subbab 3.3.2 didapatkan hasil respon keluaran suhu sistem seperti pada Gambar 4.3. Dari Gambar 4.3 tersebut terlihat bahwa kontroler fuzzy mampu memberikan nilai-nilai parameter PI untuk setiap perubahan beban yang diberikan meskipun respon keluaran yang dihasilkan terlihat lebih lambat daripada kontrol PI biasa.

4.2.3 Simulasi Sistem Nonlinear dengan Kontrol Fuzzy PD

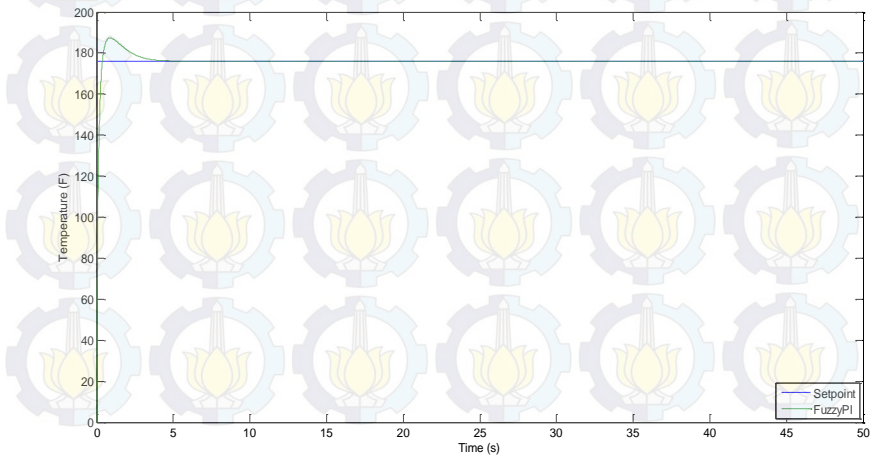
Berikutnya dalam pembahasan simulasi sistem nonlinear dengan menggunakan kontrol Fuzzy PD. Dalam perancangan kontrol Fuzzy PD seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa terdapat factor nilai *gain-gain* pada setiap masukan fuzzy, yaitu *gain* Ke, *gain* Kde dan *gain* untuk keluaran fuzzy berupa Ku.

Gain Ke dan Kde merupakan *gain* normalisasi yang digunakan sebagai masukan dalam proses fuzzifikasi, yaitu proses mengubah nilai tegas (*crisp*) menjadi nilai samar (*fuzzy*). Penentuan nilai *gain* Ke dan Kde ditentukan berdasarkan besar *error*/ selisih antara *setpoint* dan reson suhu keluaran sistem. Karena dalam pengendalian suhu pada CSTR dipilih *range* kerja proses pada suhu 176 °F, maka nilai *gain* Ke dan Kde berkisar ± 176 . Hal ini bertujuan untuk memberikan *range* nilai yang lebar agar *error* yang terjadi pada sistem berada pada area tersebut sehingga dapat dinormalisasi dalam bentuk segitiga ternormalisasinya.

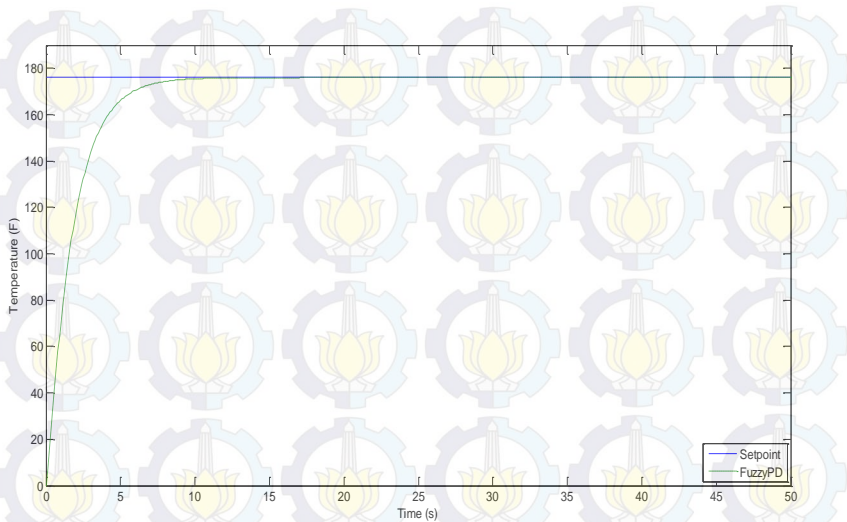


Gambar Error! No text of specified style in document..2 Respon Suhu Keluaran Menggunakan Kontrol PI

Pada perancangan kontrol *Fuzzy PD* ini digunakan 5 himpunan pendukung maka *gain* normalisasi untuk *Ke* dan *Kde* sebesar $2/176$ sehingga didapatkan *range* nilai normalisasi masukan *fuzzy* pada proses fuzzifikasi sebesar $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$. Dengan mengamati sinyal kontrol hasil keluaran kontroler *fuzzy PI*, terlihat bahwa sinyal kontrol yang dibutuhkan *plant* CSTR untuk mencapai keadaan stabil pada nilai *setpoint*/ suhu kerja yang diinginkan sebesar $-5,282$.



Gambar Error! No text of specified style in document..3 Respon Suhu Keluaran Menggunakan Kontrol *Fuzzy* PI



Gambar Error! No text of specified style in document..4 Respon Suhu Keluaran Menggunakan Kontrol *Fuzzy* PD

Sehingga untuk mendapatkan sinyal kontrol sebesar -5,282, maka keluaran *fuzzy* setelah proses defuzzifikasi ditambahkan dengan nilai *offset* sebesar -2 untuk mendapatkan keluaran *fuzzy* bernilai negatif dan dilakukan penalaan terhadap sinyal kontrol u dengan memberikan nilai *gain* K_u yang sesuai.

Respon sistem untuk suhu keluaran pada tangki reaktor CSTR terhadap besar dari laju aliran/ *flow* produk ($f = 15 \text{ ft}^3/\text{min}$) dengan menggunakan kontrol *Fuzzy* PD ditunjukkan pada Gambar 4.4.

4.3 Hasil Simulasi Perubahan *Gain* Sensor

Hasil pengukuran nilai *gain* sensor dalam sistem kontrol *closed loop* sangat mempengaruhi nilai hasil dari keluaran sistem karena nilai umpan balik yang diberikan sangat mempengaruhi *error* yang terjadi sehingga berdampak pula terhadap kesalahan atau *error* pada sistem. Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dilakukan suatu simulasi dengan memberikan perubahan nilai *gain* sensor, di mana semakin kecil nilai *gain* sensor ($K_T \approx 0$) yang diberikan berarti sensor mengalami kerusakan yang tinggi

dan juga sebaliknya semakin besar *gain* sensor ($K_T = 1$) maka sensor dalam keadaan baik/ normal.

4.3.1 Pengaruh Perubahan *Gain* Sensor Terhadap Kontrol PI

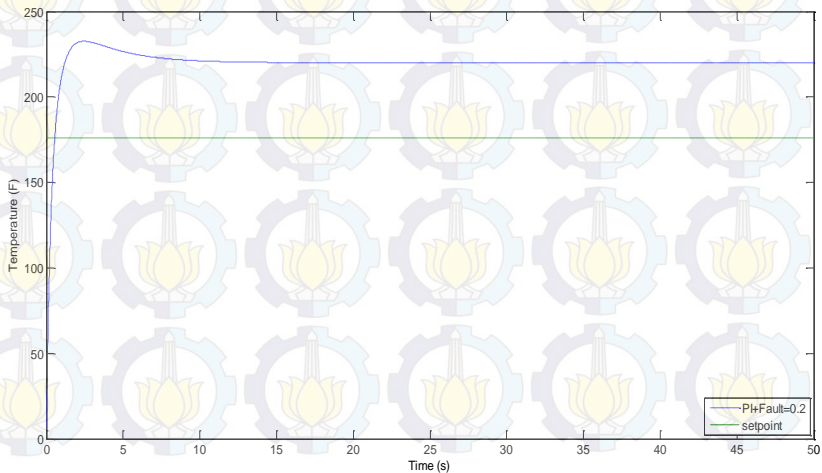
Pengaruh nilai *gain* sensor pada kontrol PI menyebabkan sistem memiliki error yang semakin besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.

Dari Gambar 4.5 tampak bahwa semakin kecil *gain* sensor yang diberikan maka error yang terjadi pada sistem semakin besar.

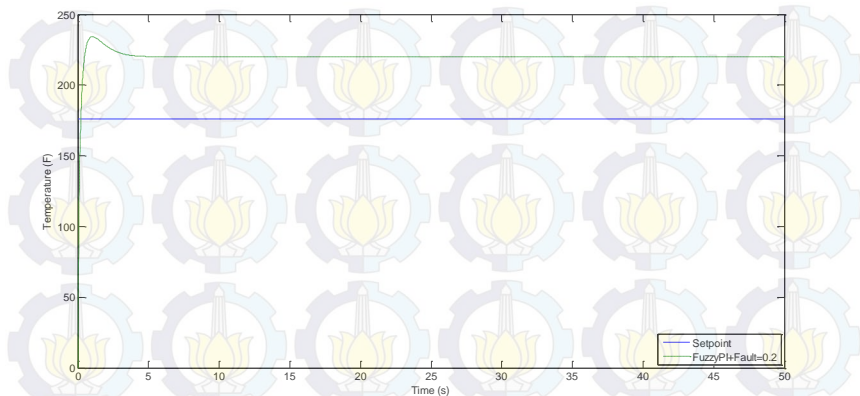
4.3.2 Pengaruh Perubahan *Gain* Sensor Terhadap Kontrol Fuzzy PI

Pengaruh perubahan *gain* sensor pada kontrol Fuzzy PI sangat berdampak besar terhadap kestabilan sistem seperti halnya pada kontrol PI. Struktur kontrol fuzzy PI ditunjukkan pada block diagram pada Gambar 3.5. Adanya faktor kontrol *integral* yang menyebabkan *error* sistem yang terjadi semakin besar karena kontrol *integral* memiliki sifat menjumlahkan *error*.

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa, pengaruh kesalahan sensor menyebabkan kontroler fuzzy PI tidak mampu memberikan nilai sinyal kontrol yang sesuai pada *plant* sehingga sistem tidak dapat mencapai suhu kerja/*setpoint* yang diinginkan.



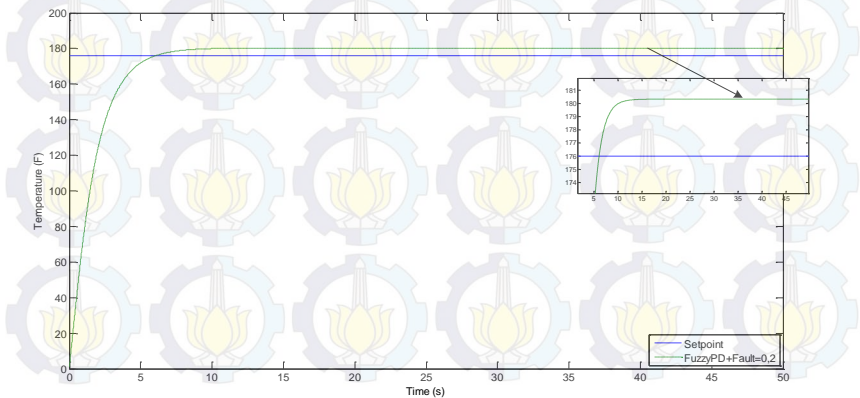
Gambar Error! No text of specified style in document..5 Pengaruh perubahan *Gain Sensor* Pada Kontrol PI terhadap Suhu Keluaran Sistem



Gambar Error! No text of specified style in document..6 Pengaruh perubahan *Gain Sensor* pada Kontrol Fuzzy PI terhadap Suhu Keluaran Sistem

4.3.3 Pengaruh Perubahan *Gain Sensor* Terhadap Kontrol Fuzzy PD

Perubahan nilai *gain* sensor terhadap keluaran sistem pada kontrol Fuzzy PD menunjukkan adanya kenaikan *error steady state* pada sistem, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Dari data yang telah diperoleh, *error steady state* yang terukur untuk perubahan nilai *gain* sensor terkecil pada 0,4 adalah 12, artinya suhu keluaran pada tangki reaktor terukur sebesar 188 °F.



Gambar Error! No text of specified style in document..7 Pengaruh perubahan *Gain* Sensor pada Kontrol *Fuzzy* PD terhadap Suhu Keluaran Sistem

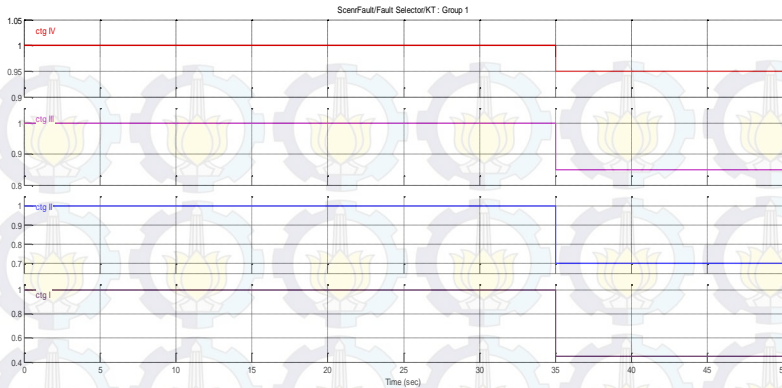
Untuk kenaikan suhu keluaran seperti ini dalam proses pencampuran dalam tangki CSTR dapat menyebabkan kegagalan dari suatu proses, terlebih lagi pada proses kimiawi, di mana dalam proses tersebut melibatkan bahan-bahan kimia sehingga sangat sensitif terhadap perubahan suhu.

Dari hasil simulasi kontrol toleransi kesalahan sensor menggunakan kontroler *Fuzzy* PD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7, terlihat bahwa *error steady state* yang terjadi pada sistem terhadap kesalahan sensor yang terjadi sebesar 4,32787 atau sebesar 2,459 %. Hal ini disebabkan karena pada kontroler *Fuzzy* PD terdapat parameter kontrol *derivative* yang bersifat mengurangi *error* sekarang dengan *error* yang sebelumnya ($e_n - e_{n-1}$) sehingga kontrol *fuzzy* PD cocok digunakan sebagai kontrol toleransi kesalahan pada sensor.

4.4 Hasil Simulasi Kontrol Toleransi Kesalahan Sensor

Pada penerapan skema FTC sebagai kontrol toleransi terhadap kesalahan sensor, dalam pengerjaan Tugas Akhir ini mensimulasikan suatu kontrol *fuzzy* PD dengan skema FTC sebagai kompensasi untuk kesalahan pengukuran/kalibrasi sensor.

Pada kontrol PI sulit untuk dilakukan penerapan toleransi kesalahan pada sensor karena nilai umpan balik yang diberikan terpengaruh oleh *gain* kesalahan yang diberikan. Faktor *integral* dalam kontrol PI menyebabkan error sistem semakin besar dan mengakibatkan sistem tidak dapat mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan.



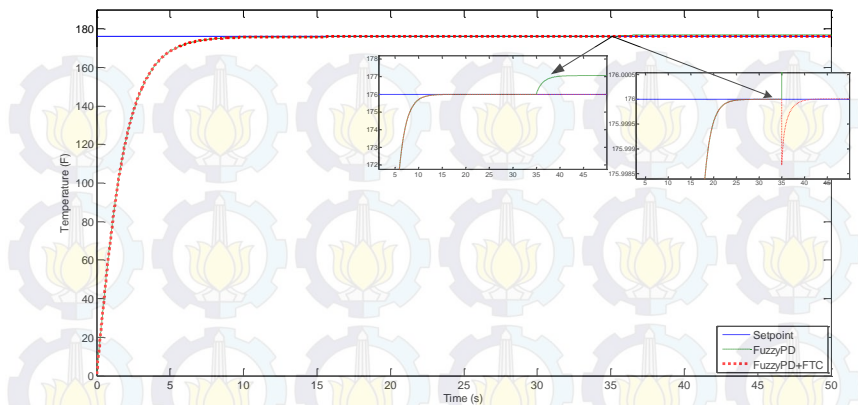
Gambar Error! No text of specified style in document..8 Sinyal Kesalahan Sensor (Kategori I-IV)

Oleh karena itu, dalam Tugas Akhir ini perancangan kontrol toleransi kesalahan sensor dengan menerapkan kontrol *Fuzzy PD* dan skema FTC pada sistem. Nilai perubahan *gain* sensor untuk setiap kategori dibentuk oleh suatu *signal builder*, seperti pada Gambar 4.8.

Pada Gambar 4.9 sampai dengan Gambar 4.12, menunjukkan pengaruh respon dari sistem terhadap kesalahan sensor yang ada. Pada pengujian ini, *gain* kesalahan pada sensor diberikan pada detik 35 dengan nilai tertentu untuk setiap kategori. Dampak dari faktor penguatan *gain* sensor tersebut mengakibatkan terjadinya kesalahan/*error steady state* pada sistem sehingga dapat mengakibatkan kegagalan sistem.

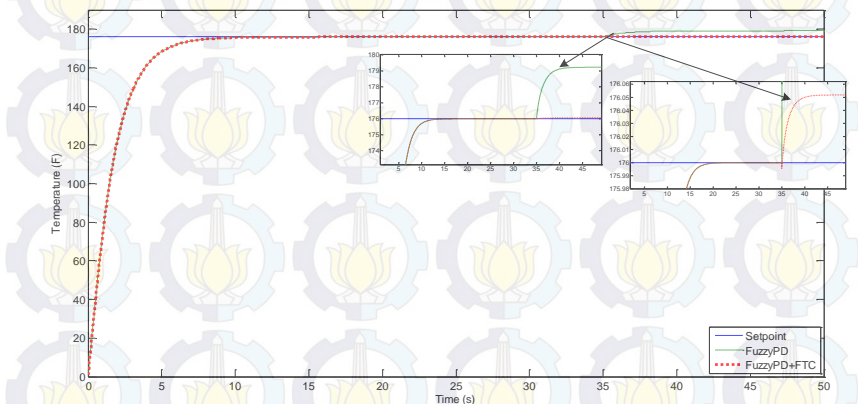
Dari Gambar 4.11, menunjukkan hasil perbandingan pengaruh kesalahan sensor untuk kategori II terhadap performansi sistem menggunakan kontroler *fuzzy PD* tanpa FTC dan kontroler *fuzzy PD* dengan skema FTC.

Pada Gambar 4.11, sistem dengan kontroler *fuzzy PD* nominal/tanpa skema FTC diberikan kesalahan sensor sebesar 0,3 atau nilai *gain feedback* (K_T) sensor sebesar 0,7 (kategori II). Dengan memberikan nilai *gain* sebesar 0,7 menyebabkan kesalahan/*error steady state* sistem cukup besar yaitu 182,57 °F atau masuk dalam kategori *critical*. Jika kondisi ini diteruskan maka akan menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan.

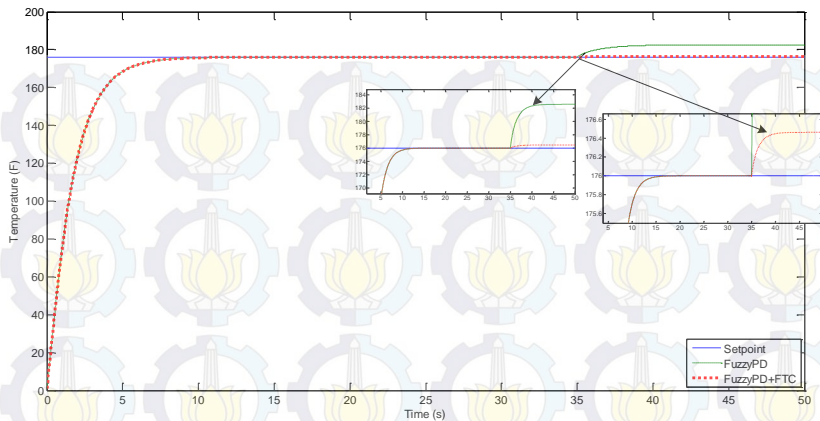


Gambar Error! No text of specified style in document..9 Respon Sistem Kesalahan Sensor Kategori IV

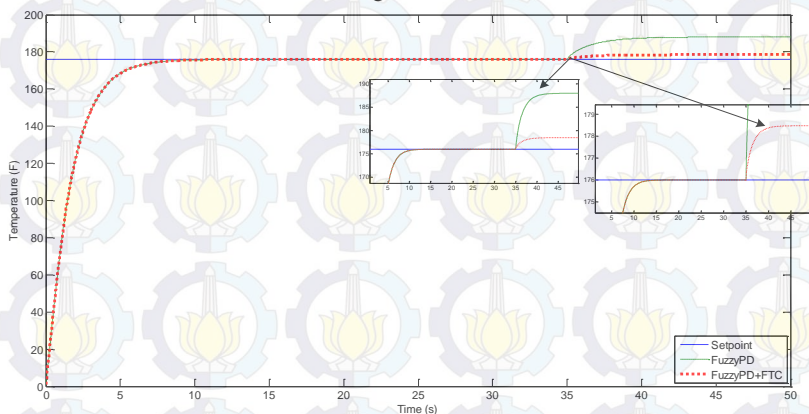
Dengan menerapkan skema FTC pada sistem, pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa adanya perbaikan terhadap performansi *error steady state* sistem. Kesalahan *error steady state* yang terukur setelah menerapkan skema FTC cukup kecil yaitu sebesar 0,263 % atau suhu keluaran dalam tangki sebesar 176,46 °F.



Gambar Error! No text of specified style in document..10 Respon Sistem Kesalahan Sensor Kategori III



Gambar Error! No text of specified style in document..11 Respon Sistem Kesalahan Sensor Kategori II



Gambar Error! No text of specified style in document..12 Respon Sistem Kesalahan Sensor Kategori I

Secara keseluruhan hasil perbandingan kontrol *fuzzy* PD tanpa skema FTC dengan kontroler *fuzzy* PD dengan FTC, akibat kesalahan sensor untuk kategori I-IV terhadap performansi sistem ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel Error! No text of specified style in document..1 Perbandingan *Fuzzy* PD tanpa FTC vs. *Fuzzy* PD dengan FTC

Tingkat Kesalahan	<i>Fuzzy PD tanpa FTC</i> (% e_{ss})	<i>Fuzzy PD + FTC</i> (% e_{ss})
Kategori I	$e_{ss} = 6,82$	$e_{ss} = 1,41$
Kategori II	$e_{ss} = 3,73$	$e_{ss} = 0,26$
Kategori III	$e_{ss} = 1,83$	$e_{ss} = 0,03$
Kategori IV	$e_{ss} = 0,60$	$e_{ss} \approx 0$

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

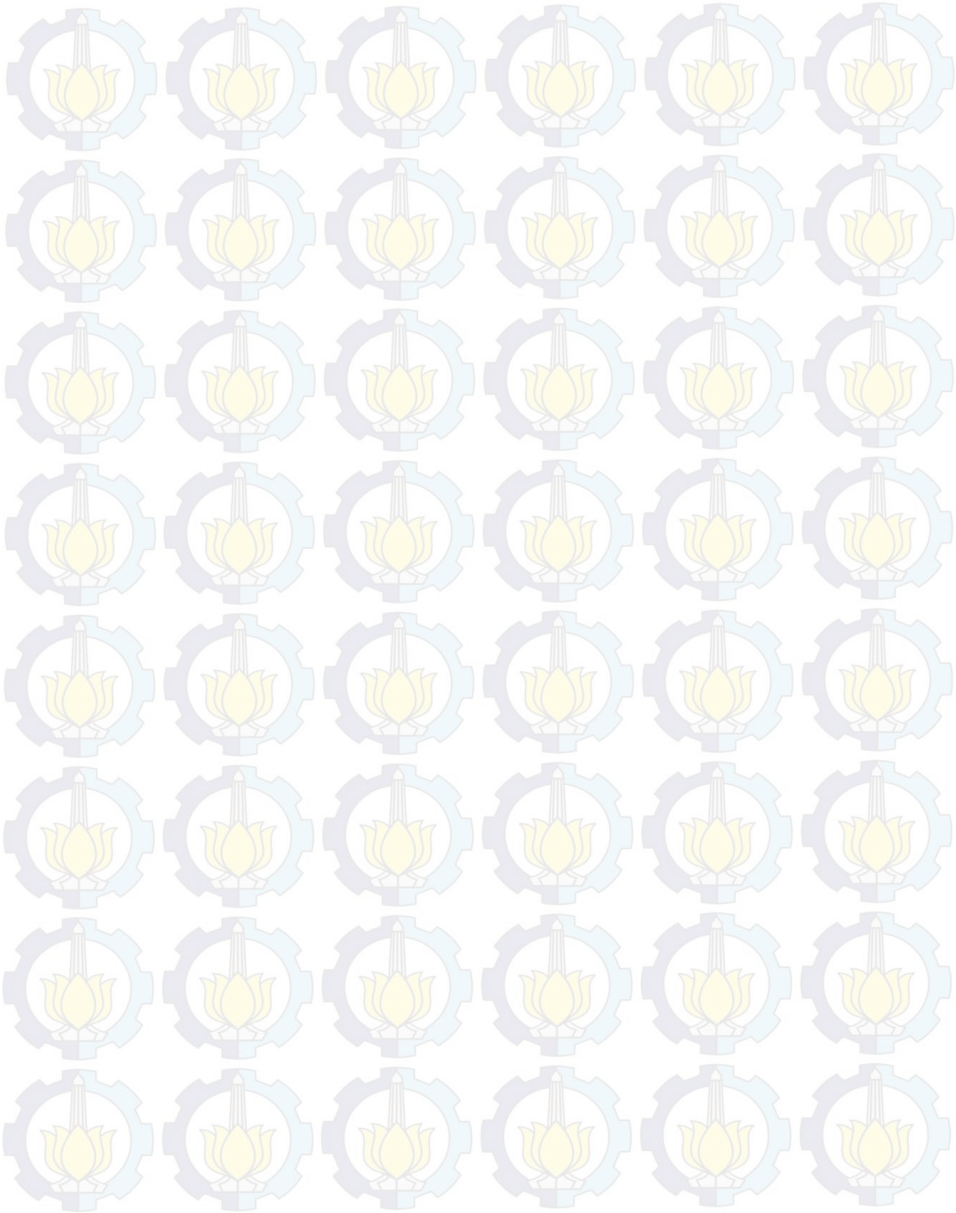
Pada penelitian ini, hasil informasi kesalahan yang terdeteksi digunakan untuk menentukan kategori-kategori yang kemudian dijadikan dasar dalam perancangan suatu skenario kesalahan untuk mengkompensasi kesalahan sensor yang terjadi. Penerapan kontroler *fuzzy* PD dengan skema FTC dapat mengkompensasi kesalahan sensor dari setiap kategori kesalahan yang terjadi sehingga mampu memperbaiki performansi sistem. Kontrol *fuzzy* PD dengan skema FTC tersebut mampu memberikan perbaikan terhadap *error steady state* (e_{ss}) yang terjadi pada sistem, dimana untuk kategori I perbaikan *error steady state* mencapai 79,3%. Sedangkan untuk kategori II, III dan IV perbaikan *error steady state* pada sistem hingga diatas 90%.

5.2 Saran

Pada Tugas Akhir ini, kontrol *Fuzzy* PD dirancang sebagai kontrol toleransi kesalahan pada sensor. Pada pengembangan berikutnya dapat ditambahkan suatu kontrol *predictive* sehingga mampu memprediksi kesalahan yang terjadi pada proses berikutnya.



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----



LAMPIRAN

A-1. DATA KESALAHAN SENSOR

Tabel A-1 Pengukuran Kesalahan Sensor

<i>Gain</i> Sensor (K_T)	<i>Model Fuzzy PD</i>		
	Error Sensor (eSe)	Error Target (eT)	Penurunan Performansi Sistem (%)
1	0	0	0
0,99	1,762115	-0,21145	0,120144
0,98	3,528468	-0,42342	0,240577
0,97	5,299077	-0,63589	0,361301
0,96	7,073955	-0,84887	0,482315
0,95	8,853119	-1,06237	0,603622
0,94	10,63658	-1,27639	0,725222
0,93	12,42436	-1,49092	0,847116
0,92	14,21648	-1,70598	0,969305
0,91	16,01294	-1,92155	1,091791
0,9	17,81377	-2,13765	1,214575
0,89	19,61897	-2,35428	1,337657
0,88	21,42857	-2,57143	1,461039
0,87	23,24258	-2,78911	1,584722
0,86	25,06103	-3,00732	1,708706
0,85	26,88391	-3,22607	1,832994
0,84	28,71126	-3,44535	1,957586
0,83	30,54308	-3,66517	2,082483
0,82	32,37939	-3,88553	2,207686
0,81	34,22022	-4,10643	2,333197
0,8	36,06557	-4,32787	2,459016

Gain Sensor (K_T)	Model Fuzzy PD		
	Error Sensor (eSe)	Error Target (eT)	Penurunan Performansi Sistem (%)
0,79	37,91547	-4,54986	2,585146
0,78	39,76993	-4,77239	2,585146
0,77	41,62896	-4,99548	2,838338
0,76	43,49259	-5,21911	2,965404
0,75	45,36082	-5,4433	3,092784
0,74	47,23369	-5,66804	3,220479
0,73	49,1112	-5,89334	3,348491
0,72	50,99338	-6,11921	3,476821
0,71	52,88023	-6,34563	3,60547
0,7	54,77178	-6,57261	373444
0,69	56,66805	-6,80017	3,863731
0,68	58,56905	-7,02829	3,993344
0,67	60,4748	-7,25698	4,123282
0,66	62,38532	-7,48624	4,253545
0,65	64,30063	-7,71608	4,384134
0,64	66,22074	-7,94649	4,51505
0,63	68,14567	-8,17748	4,646296
0,62	70,07544	-8,40905	4,777871
0,61	72,01007	-8,64121	4,909778
0,6	73,94958	-8,87395	5,042017
0,59	75,89398	-9,10728	5,17459
0,58	77,8433	-9,3412	5,307498
0,57	79,79755	-9,57571	5,440742
0,56	81,75676	-9,81081	5,574324
0,55	83,72093	-10,0465	5,708245
0,54	85,69009	-10,2828	5,842506

Gain Sensor (K_T)	Model Fuzzy PD		
	Error Sensor (eSe)	Error Target (eT)	Penurunan Performansi Sistem (%)
0,53	87,66426	-10,5197	5,977109
0,52	89,64346	-10,7572	6,112054
0,51	91,62771	-10,9953	6,247344
0,5	93,61702	-11,234	6,382979
0,4	112,8	-12	6,818182

A-2. APPENDIX

Suhu (T) : °F = $(1,8 * t) + 32$ °C

Volume (V) : 1 ft³ = 28,32 dm³

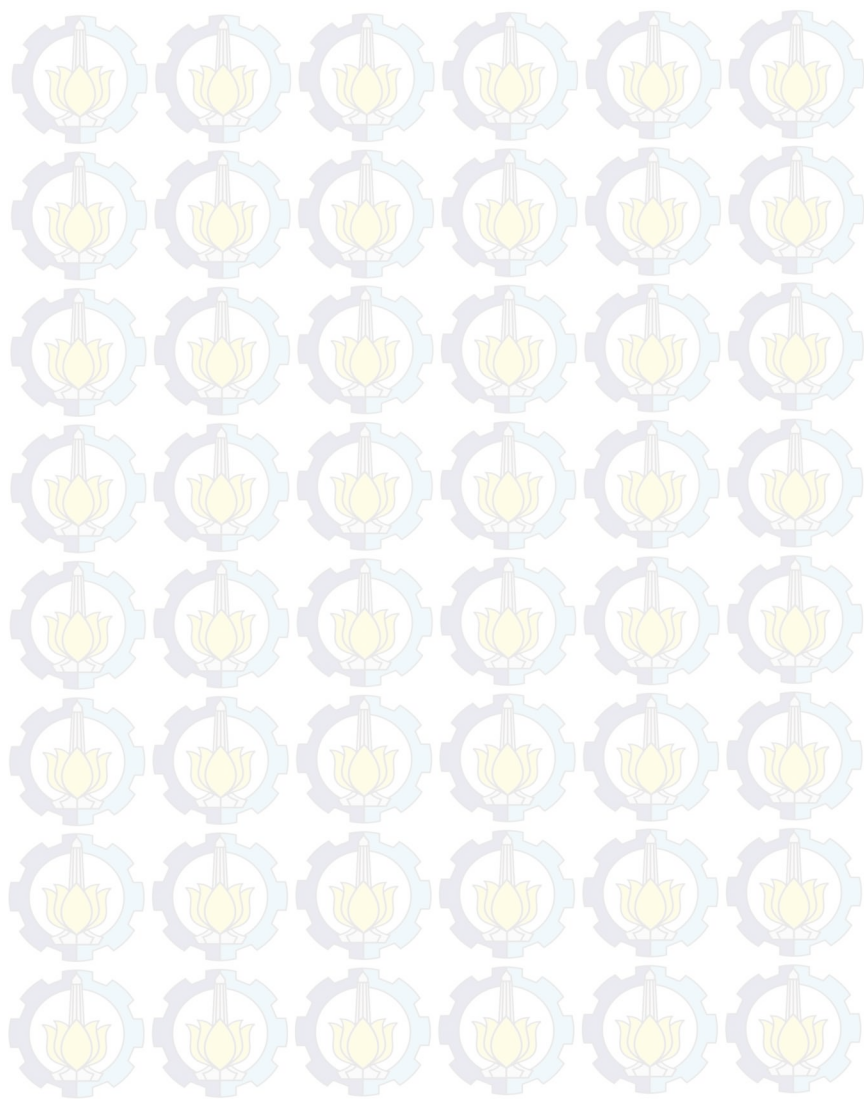
Flow (f) : 1 ft³/min = 1,7 m³/h

Berat Jenis (ρ) : 1 lb/ft³ = 16,018 kg/m³

Enthalpi cairan (h) : 1 Btu/lb = 2,326 J/kg

Lua Transfer Panas (A) : 1 ft² = 0,0929 m²





RIWAYAT HIDUP



Moch Hafid merupakan nama lengkap penulis. Penulis dilahirkan di Surabaya tanggal 28 Maret 1989 yang merupakan putra pertama dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikannya dari TK. Nurul Islam Surabaya kemudian melanjutkan studinya di MI Nurul Islam Surabaya, SMPN 31 Surabaya, dan SMAN 8 Surabaya. Setelah menamatkan pendidikan SMA, penulis melanjutkan studinya di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan mengambil Program Studi Teknik Elektronika dan lulus pada tahun 2011. Sebelum melanjutkan studi S1, penulis berkesempatan untuk bekerja di suatu perusahaan kontraktor yang bergerak dibidang *Integrator and Automation System* selama ± 5 bulan dan pada akhirnya di tahun 2012 penulis meneruskan studi sarjana di Teknik Elektro ITS, kemudian fokus pada bidang studi Teknik Sistem Pengaturan. Pada bulan Januari 2014 penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----